



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Sami Tapani Peltoniemi

# GENERAATTORISUOJAUKSEN TESTAUS VESIVOIMALAITOKSESSA

Tekniikka  
2016

## **ALKUSANAT**

Tämä työ tehtiin kesällä 2010 Vaasan ammattikorkeakoulun sähkötekniikan koulutusohjelmassa. Työn toimeksiantajana oli VEO Oy.

Toimeksiantajan puolesta ohjaajana toimi insinööri Holger Wik. Vaasan ammattikorkeakoulusta ohjaajana toimi lehtori Olavi Mäkinen.

Kiitän ohjaajiani Olavi Mäkistä, Holger Wikiä sekä kaikkia, jotka ovat omalta osaltaan minua työssä auttaneet.

Vaasassa 30.5.2016

Sami Peltoniemi

## TIIVISTELMÄ

|                    |   |
|--------------------|---|
| Tekijä             | Sami Peltoniemi                                     |
| Opinnäytetyön nimi | Generaattorisuojauksen testaus vesivoimalaitoksissa |
| Vuosi              | 2010  |
| Kieli              | suomi   |
| Sivumäärä          | 55  |
| Ohjaaja            | Olavi Mäkinen                                       |
| Ohjaaja VEO        | Holger Wik  |

---

Tämän työn tarkoituksena on esitellä vesivoimalaitoksen generaattorisuojauksen laskentaperiaatteita ja releen testausta tehdasolosuhteissa. Idea työhön syntyi VEO Oy:n toimesta.

Uuden reletestauslaitteen hankinnan myötä oli mahdollisuus kehittää tehdaskoestusmenetelmää helpommaksi ja nopeammaksi. Työ toimii varmasti hyvin uusille suunnittelijoille mallina generaattorisuojauksen osalta.

## ABSTRACT

|                   |   |
|-------------------|---|
| Author            | Sami Peltoniemi                                     |
| Title             | Testing of Generator Protection in Hydropower Plant |
| Year              | 2010  |
| Language          | Finnish   |
| Pages             | 55  |
| Supervisor        | Olavi Mäkinen                                       |
| Supervisor in VEO | Holger Wik  |

---

The main goal of this work was to give an example how to create and calculate generator protection. The idea for this thesis came from VEO Oy. A new relay testing instrument DTRS.6 gives possibilities to improve factory tests in an easier and faster way.

This thesis is also an example for new engineers how to create and test generator protection.

The TDMS – Manual Control program makes it easy to create testing programs. Once the testing program has been created, it is possible to save it and use it again. This saves time and money while testing relays. The test results are easy to read and share with customers in a format that they want.

# SISÄLLYS

ALKUSANAT

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

|  |    |
|--|----|
| 1 JOHDANTO .....   | 5  |
| 1.1 Yritysesittely VEO Oy .....                                | 5  |
| 1.2 Työn tavoitteet .....                                      | 5  |
| 2. VESIVOIMA.....  | 7  |
| 2.1 Yleistä vesivoimasta .....                                 | 7  |
| 2.2 Kaaranneskosken vesivoimalaitos.....                       | 8  |
| 2.3 Pääkaavio .....  | 9  |
| 2.4 Suojauskaavio.....   | 12 |
| 2.5 Ohjaustaulun komponenttilayout.....                        | 14 |
| 2.6 Suojareleen kytkentäkuva .....                             | 15 |
| 3. GENERAATTORI.....   | 16 |
| 3.1 Generaattori vesivoimalaitoksessa.....                     | 16 |
| 3.2 Generaattorin suojaus.....                                 | 17 |
| 3.3 Generaattorin suojareleen VAMP 210, suojausfunktiot .....  | 19 |
| 3.3.1 Ylivirtasuoja [ $I>$ ] (50/51).....                      | 21 |
| 3.3.2 Jänniteohjattu ylivirtasuoja [ $I_{V>}$ ] (51V) .....    | 21 |
| 3.3.3 Vinokuormitussuoja [ $I_{2>}$ ] (46) .....               | 23 |
| 3.3.4 Nollavirtasuoja [ $I_{0>}$ ] (50N/51N) .....             | 24 |
| 3.3.5 Nollajännitesuoja [ $U_0$ ] (59N) .....                  | 24 |
| 3.3.6 Ylijännitesuoja [ $U>$ ] (59).....                       | 25 |
| 3.3.7 Alijännitesuoja [ $U<$ ] (27/60).....                    | 26 |
| 3.3.8 Taajuussuojat (81H/81L) .....                            | 27 |
| 3.3.9 Taajuusmuutossuoja [ $df/dt$ ] (81R).....                | 28 |
| 3.3.10 Ylikuormitussuoja [ $T>$ ] (49) .....                   | 30 |
| 3.3.11 Takatehosuoja [ $P<$ ] (32) .....                       | 31 |
| 3.2.12 Alimagnetointisuoja $Q<$ (40) .....                     | 33 |
| 3.2.13 Alireaktanssisuoja $X<$ (40) .....                      | 35 |
| 3.2.14 Alireaktanssisuojan testaus ISA DRTS-6 laitteella ..... | 37 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 3.2.15 | Ali-impedanssisuoja $Z_{<}$ (21).....      | 48 |
| 3.2.16 | Katkaisijavikasuoja CBFP [50BF.....        | 49 |
| 4.     | TALOUELLINEN TARKASTELU .....              | 50 |
| 4.1    | Suojauksen merkitys .....                  | 50 |
| 4.2    | Pörssistä ostetun sähkön kustannukset..... | 51 |
| 5.     | YHTEENVETO.....                            | 53 |
|        | LÄHTEET.....                               | 54 |

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| $A$            | ampeeri                       |
| $\cos \varphi$ | tehokerroin                   |
| $df/dt$        | taajuusmuutos                 |
| $f<, f<<$      | alitaajuusportaat             |
| $fX, fXX$      | ylitaajuusportaat             |
| $Hz$           | hertz                         |
| $I0$           | nollavirta                    |
| $I2>$          | vinokuorma                    |
| $IGEN$         | generaattorin nimellisvirta   |
| $I_k$          | oikosulkuvirta                |
| $I_v>$         | jänniteohjattu ylivirtasuojia |
| $I_{pri}$      | virran arvo ensiössä          |
| $I_{sec}$      | virran arvo toisiossa         |
| $I>$           | ylivirtaportaat               |
| $I_{setPri}$   | virran asetteluvarvo ensiössä |
| $I_{inj}$      | virran havahtumisraja         |
| $I_k''$        | alkuoikosulkuvirta            |
| $kV$           | kilovoltti                    |
| $n$            | nopeus                        |
| $n_{max}$      | maksimi kierrosnopeus         |

|         |                           |
|---------|---------------------------|
| $ms$    | millisekunti              |
| $MW$    | megawatti                 |
| $P$     | pätöteho                  |
| $Pa$    | turbiinin akseliteho      |
| $Pm$    | akseliteho                |
| $Pset$  | tehon asetteluarvo        |
| $Q$     | loisteho                  |
| $r/min$ | kierros/minuutti          |
| $SGEN$  | näennäisteho              |
| $Sk''$  | alkuoikosulkuteho         |
| $TWh$   | terawattitunti            |
| $TWh/a$ | terawattitunti/vuosi      |
| $UGEN$  | generaattorin jännite     |
| $Uinj$  | jännitteen laukaisuraja   |
| $xd$    | pitkittäisalkureaktanssi  |
| $xd''$  | pitkittäistahtireaktanssi |
| $Zn$    | impedanssi                |



## KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

**Kuva 1.** Kaaranneskosken vesivoimalaitos.

**Kuva 2.** Kaaranneskosken pääkaavio.

**Kuva 3.** Kiskoston ja generaattorin suojauskaavio.

**Kuva 4.** Ohjaustaulun komponenttilayout.

**Kuva 5.** Generaattorinsuojareleen VAMP 210 kytkentäkaavio.

**Kuva 6.** Jännitesäädetyin ylivirtaportaan  $I_v >$  ominaiskäyrä.

**Kuva 7.** Tehon tuotannolle asetetut vaatimukset verkon taajuuden ja jännitteen vaihdellessa.

**Kuva 8.** Esimerkki  $df/dt$  suojan toiminnasta.

**Kuva 9.** Ylikuormitussuojan ominaiskäyrä.

**Kuva 10.** Takatehosuojan havahtumisalue Reverse Power Trip Area.

**Kuva 11.** Alimagnetoinnin asettelut käyttäen parametreja Q1 ja Q2.

**Kuva 12.** Alimagnetoinnin asettelut Q1 ja Q2 parametrien avulla.

**Kuva 13.** Havahtumisympyrä.

**Kuva 14.** Alireaktanssin havahtumisympyrä.

**Kuva 15.** Test Plan Editor.

**Kuva 16.** Test Plan Editorin Generic Test-valikko.

**Kuva 17.** Prefault makro-näkymä.

**Kuva 18.** P1-havahtumispisteen asettelun arvot Ramp-makrossa.

**Kuva 19.** P2-havahtumispisteen asettelun arvot Ramp-makrossa.

**Kuva 20.** Laukaisuajan asetusarvot Shot-makrossa.

**Kuva 21.** Test Plan Editor-näkymä.

**Kuva 22.** Editorilla tehdyt testimakrot.

**Kuva 23.** Test Plan ns. suoritusikkuna.

**Kuva 24.** Test Table-taulukko.

**Kuva 25.** Tulokset Tests Table-taulukossa.

**Kuva 26.** Ali-impedanssisuoja.

**Taulukko 1.** Generaattorin vian suorat vaikutukset ja kustannukset.

**Taulukko 2.** Generaattorivian epäsuorat vaikutukset ja kustannukset.

**Taulukko 3.** Sähkön pörssihinta Suomessa kesäkuussa 2010(euroa/MWh).

# **1 JOHDANTO**

## **1.1 Yritysesittely VEO Oy**

Vaasa Engineering Oy on perustettu vuonna 1989. Vaasa Engineering Oy, Vaasa Kojeistot Oy, Vaasa Service Oy ja Vaasa Engineering Magnetointi Oy yhdistyivät vuonna 2012, jonka jälkeen yritystä on kutsuttu VEO Oy:ksi. Yrityksen pääkonttori ja tuotantotilat ovat Vaasassa. VEO Oy:llä on konttoreita myös Seinäjoella, Rovaniemellä ja Paimiossa, sekä tytäryhtiöt Ruotsissa, Norjassa ja Venäjällä. Yritys työllisti vuonna 2013 noin 400 henkilöä ja sen liikevaihto oli noin 63 miljoonaa euroa.

VEO on jaettu kolmeen liiketoimintayksikköön: vesi- ja lämpövoimalaitokset, käytöt ja sähköistykset sekä diesel- ja kaasumootorilaitokset. Tämä työ tehtiin vesi- ja lämpövoimalaitosyksikköön. VEO:n asiakkaita ovat sähkö- ja energiayhtiöt sekä teollisuus Suomessa ja ulkomailla.

Vesi- ja lämpövoimalaitokset-yksikkö toimittaa asiakkailleen laitteita ja järjestelmiä uusiin lämpö- ja vesivoimalaitoksiin sekä vanhojen laitosten saneerauksiin. Käytöt ja sähköistykset-yksikkö toimittaa sähkönjakeluun ja sähköasemiin liittyviä kokonaisratkaisuja sähkölaitoksille ja teollisuudelle maailmanlaajuisesti. Diesel- ja kaasumootori-yksikkö toimittaa asiakkailleen sähköistys- ja automaatiojärjestelmiä eri puolille maailmaa.

Vaasa Kojeistot Oy valmistaa ohjaus-, jakelu-, automaatiojärjestelmiä sekä sähkökäyttösovelluksiin tarvittavia kojeistoja. Yritys keskittyy kotimaan sekä ulkomaan vientiin.

Vaasa Service Oy toteuttaa sähkö- ja automaatioasennuksia ympäri maailmaa.

## **1.2 Työn tavoitteet**

Vaasa Engineering Oy:llä on tällä hetkellä käytössä kaksi yksivaiheista releen koestuslaitetta, jotka molemmat ovat yleensä käyttöönotoissa mukana. Uudessa releen koestuslaitteessa on kuusi virransyöttöä ja kolme jännitesyöttöä. Tällöin

esim. generaattorin suojareleen ja erovirtareleen testaus helpottuisi ja nopeutuisi huomattavasti.

Työn tarkoituksena on myös toimia ohjeena releasetuksien määrittämisessä sekä laskemisessa. Malliksi on otettu Kaaranneskosken vesivoimalaitosprojekti, jossa on käytössä yleisimmät suojausportaat.

## 2. VESIVOIMA

### 2.1 Yleistä vesivoimasta

Vesivoima on merkittävin uusiutuva sähköntuotantomuoto Suomessa. Energiajärjestelmän toimivuuden ja käyttövarmuuden kannalta vesivoimalla on lisäksi erityinen asema säätöominaisuutensa vuoksi. Vesivoimalaitoksissa tuotetaan energiaa hyödyntämällä kahden eri vesitason välistä korkeuseroa. Vesi virtaa alas turbiinin kautta. Turbiini pyörittää generaattoria, joka muuntaa veden energian sähköksi. /1/

Perinteisesti vesivoimalla on ollut Suomen sähköntuotannossa suuri merkitys. Suurimmillaan sen osuus Suomen sähköntuotannosta, jopa 90 %, oli 1950- ja 1960-luvuilla. Nykyisin vesivoiman osuus sähköntuotannosta vaihtelee Suomessa vuosittain 10-20 % välillä riippuen vesitilanteesta. Vuonna 2009 vesivoiman osuus koko Suomen sähköntuotannosta oli 15,6 %. (80,8 TWh). /1/

Tulevaisuuden energiamuotona Suomessa on rakentamiskelpoista vesivoimaa kaikkiaan 1710 MW, energiana 6,7 TWh/a. Tämä vastaa noin puolta rakennetusta vesivoimasta. Vesivoima on uusiutuvaa energiaa. Vesivoiman tuotantoa voidaan merkittävästi lisätä saneeraamalla vanhoja vesivoimalaitoksia, jotka ovat jo liitettyinä voimantuotantoon./8/

Sähköntuotannon nopeaan säätöön soveltuvaa, taloudellisesti merkittävää vesivoimaa, voitaisiin lisätä vuoteen 2020 mennessä 470 MW, energiana 1,3 TWh/a. Noin neljännes tästä energiamäärästä toteutunee suunniteltuina koneistojen uusintoina jo toimivissa voimalaitoksissa. Tärkeimmät muut rakennushankkeet sijaitsevat Kemijoella, Iijoella ja Kymijoella, joiden vaikutuspiirissä on yli puolet Suomen rakennetusta vesivoimasta./8/

Edellä todetun lisäksi, teknistaloudellisesti merkittävää vesivoimaa on Ounasjoella ja Iijoen keskijuoksulla yhteensä 460 MW tehoa ja 1,6 TWh/a energiaa. Molemmat vesistöt ovat suojeltuja. /8/

## 2.2 Kaaranneskosken vesivoimalaitos

Työn malliprojektina toimi Kaaranneskosken vesivoimalaitoksen saneeraus. Tengeliönjoen Kaaranneskosken (**kuva1.**) vesivoimalaitoksen teho on 2,5 MW, josta Pohjolan Voiman osuus on 1,3 MW. Voimalaitoksen putouskorkeus on 16 m. Voimalaitos valmistui vuonna 1954. Pohjolan Voiman 50-prosenttisesti omistama Torniolaakson Voima Oy omistaa Kaaranneskosken voimalaitoksen.

Vesivoimalaitoksen sähköjärjestelmään kuuluu generaattori, keski- ja pienjännitejärjestelmä, tehomuuntaja verkkoon liittymistä varten, omakäyttömuuntaja, apusähköjärjestelmä sekä valvonta-, ohjaus- ja suojausjärjestelmät. Laitoksella uusittiin ohjaus-, suojaus- ja säätöjärjestelmät. Koneistoautomaatio sisältää koneiston normaalit valvonnat, integroidun turpiinisäädön ja erillislaitteella toteutetun magnetoinnin liittynät. Generaattorin tahdistus on toteutettu automaattitahdistimella. Voimalaitoskoneiston mekaaniset suojat ja valvontalaitteet ovat osa automaatiojärjestelmää. Automaatiojärjestelmä mahdollistaa voimalaitoksen käytön miehittämättömänä ja sen ohjaukset voidaan suorittaa joko paikallisesti laitokselta tai kaukokäytön kautta keskusvalvomosta.



**Kuva 1.** Kaaranneskosken vesivoimalaitos.

### 2.3 Pääkaavio

Kaaranneskosken vesivoimalaitos koostuu turbiinista, generaattorista, omakäyttömuuntajasta sekä päämuuntajasta. 3,1 MVA:n generaattori saa voimansa turbiinin pyörimisnopeudesta. Generaattori syöttää kojeistoa, joka toimii 6,3 kV jännitteellä. Kojeistosta on lähtö omakäyttömuuntajalle, joka syöttää 400 V kojeistoa. 400 V keskuksessa on moottorilähtöjä pumpuille, lämmityksille yms. pikkulähtöjä. 6,3 kV kojeistosta on toinen lähtö päämuuntajalle (45 kV / 6,3 kV), joka sijaitsee kytkinkentällä.

Sähköjärjestelmän kytkennän ja laitteiden valinta perustuu eri vaihtoehtojen välillä suoritettaviin teknis-taloudellisiin vertailuihin, joissa otetaan huomioon hankintahinta, hyötysuhteet, käytettävyys, käyttö- ja huoltokustannukset, laajennusmahdollisuudet ja lähtökohtatilanne. Perusvaihtoehtoja ovat konekohtaisilla tehomuuntajilla varustettu kytkentä ja kokoojakiskokytkentä. Pääkaaviosta voidaan havaita sähköpääpiirin tärkeimmät laitteet:

- generaattori
- generaattorijännitekojeisto ja tähtipistejärjestelmät

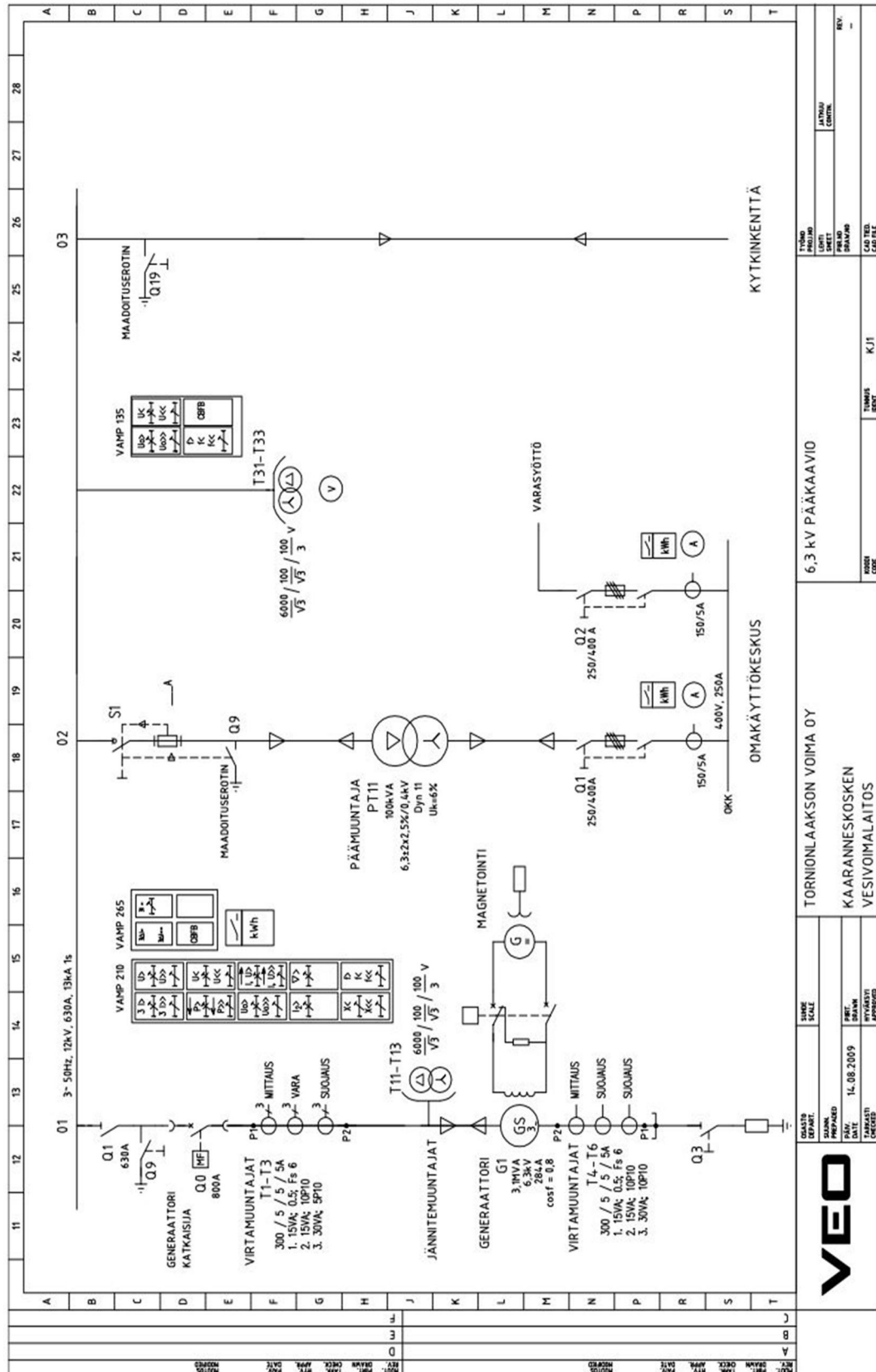
- pääkaapeli- ja kiskojärjestelmä
- päämuuntaja
- pääkytkinlaitos
- johtoyhteys jakelu- tai kantaverkkoon.

Sähköpuolen tärkeimmät apujärjestelmät ovat

- omakäyttöjärjestelmä
- apusähköjärjestelmä.

Kuvassa 2 on esitelty Kaaranneskosken vesivoimalaitoksen pääkaavio.

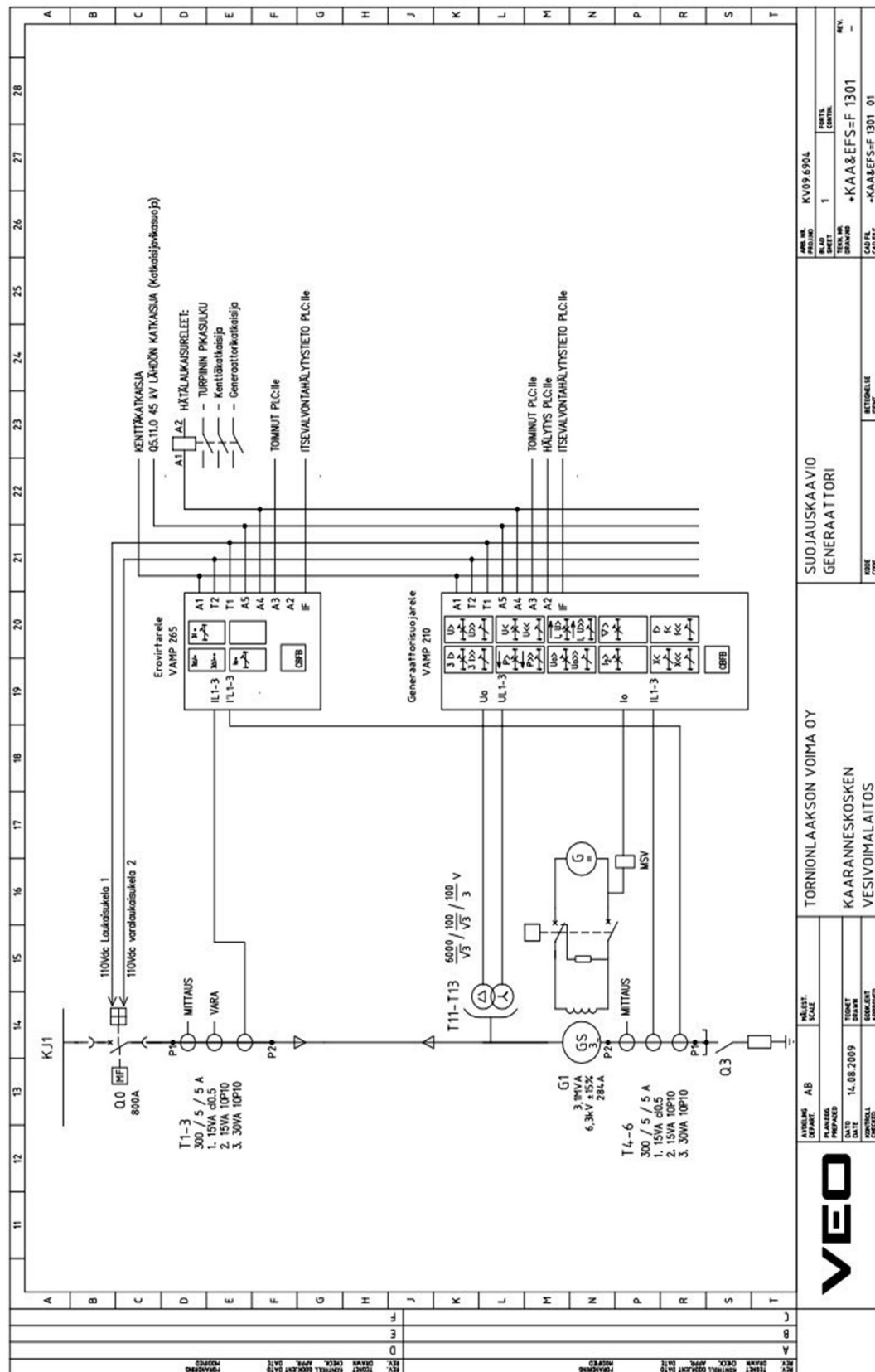




**Kuva 2.** Kaaranneskosken pääkaavio.

## 2.4 Suojauskaavio

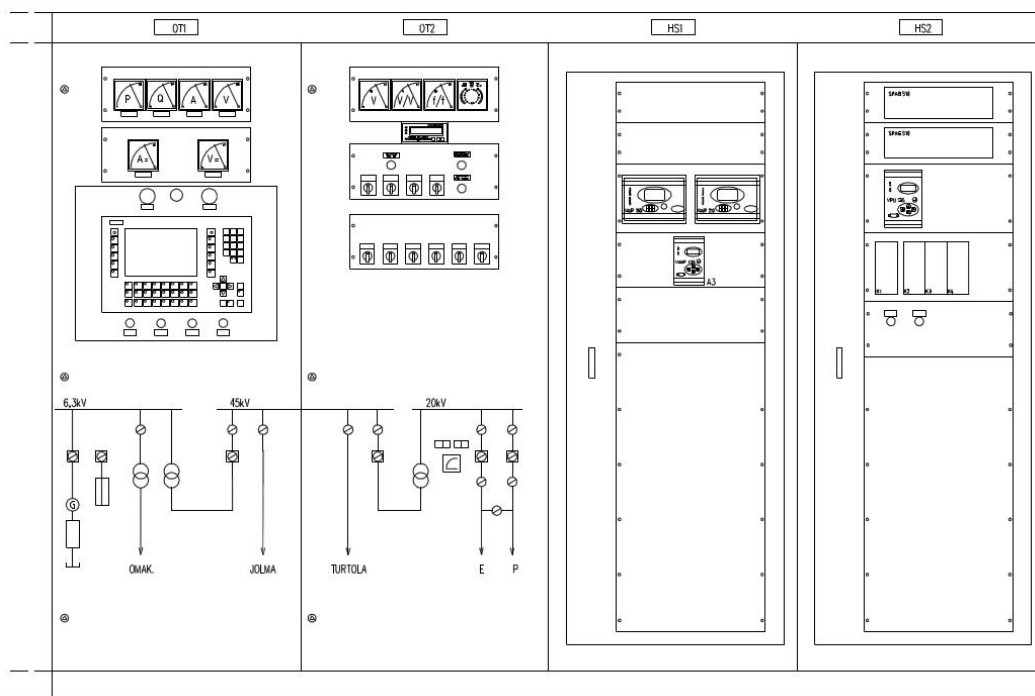
Suojauskaaviossa on esitettyä generaattorin suojaus VAMP 210 sekä erovirtarele VAMP 265 (**Kuva 3.**) Tässä työssä tarkastellaan lähemmin generaattorin suojausleiden toimintaa. Kuvasta 4 nähdään, että generaattorisuojausta lähtee erilaisia hälytyksiä yhteensä 8 kpl. Generaattorikatkaistijalle lähtevät sen ohjaussignaali (Trip 1 (T1)) ja varalaukaistusignaali (Trip 2 (T2)). Varalaukaistus T2 toimii, jos T1 jostain syystä ei aukaise katkaistijaa. Magnetoimintipiirin katkaistijan ohjaussignaali (A1) aukaisee magnetoinnin kenttäkatkaistijan. Signaali (A2) lähettää hälytystiedon automaatioon aina, kun jokin suojausporras hälyttää. Signaali A3 lähettää tiedon automaatiolle, kun jokin Trip-laukaistusta on toiminut. Signaalilla A4 voidaan ohjata hätälaukaistureita. Hätälaukaistureiden laukaistus ajaa turbiinin pikasulkuun ja aukaisee sekä generaattori- että kenttäkatkaistijan.



**Kuva 3.** Kiskoston ja generaattorin suojauskaavio.

## 2.5 Ohjaustaulun komponenttilayout

Ohjaustaulun komponenttilayoutkuvan tarkoitus on auttaa käyttäjäänsä löytämään heti etsimänsä komponentit, esimerkiksi missä kennossa on tehomittari (**Kuva 4.**) Kaaranneskosken ohjaustaulussa on neljä kennoa: OT1, OT2, HS1 ja HS2. Komponentit on luetteloitu ja dokumentoitu kennojen mukaisessa järjestyksessä. Mimiikka ovesa havainnollistaa sähköverkkoa ja siitä on helposti luettavissa kytkimien ja erottimien asennot. Laitoksen ohjaus tapahtuu pääasiassa OT1-kennossa olevasta ohjauspaneelista. Ohjausjärjestelmiin sisältyviä komponentteja ovat mm. mittarit, merkkilamput, kytkimet, suojareleet ja ohjauspaneeli.



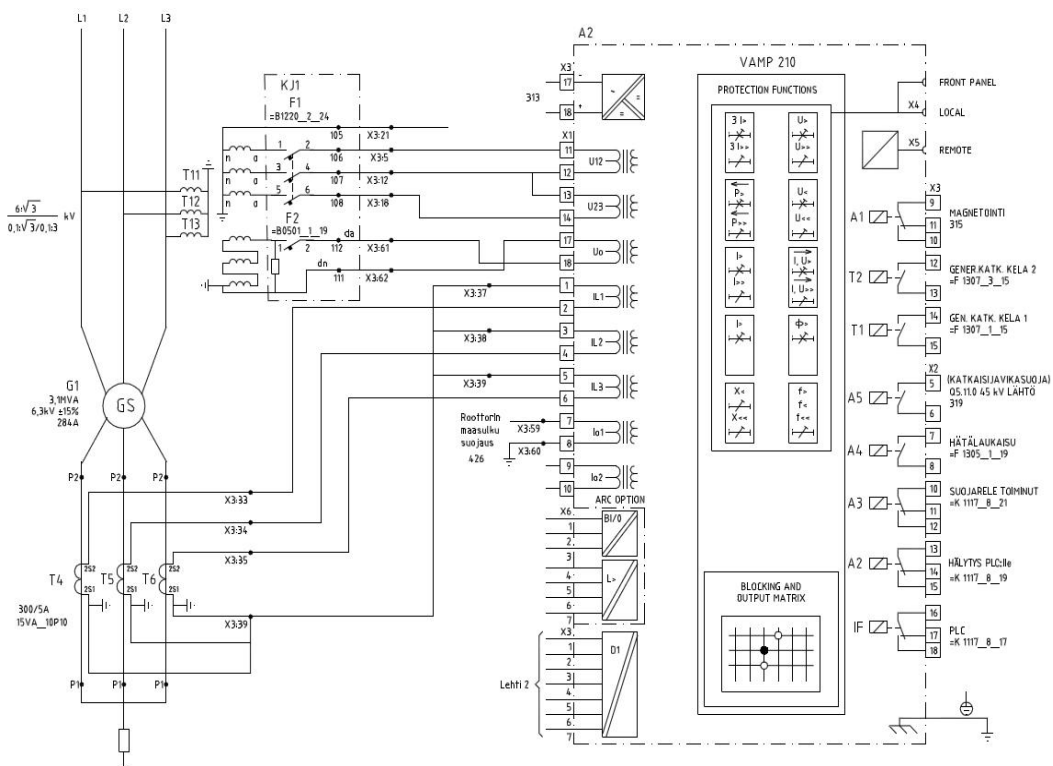
**Kuva 4.** Ohjaustaulun komponenttilayout.

Nykyisin vesivoimalaitoksen ohjausjärjestelmät toteutetaan automaatiojärjestelmän avulla, joka koostuu Controlnet-väylän avulla toisiinsa liitetystä vapaasti ohjelmoitavista prosessiasemista. Prosessiasema pohjautuu Allen-Bradleyn Control Logix-ohjausjärjestelmäteknikkaan ja on toiminnallisesti itsenäinen yksikkö, sisältäen ohjelmoitavan ohjausyksikön ja tarvittavat tulo- ja

lähtöyksiköt. Automaatiojärjestelmä sisältää tehokkaan itsediagnostiikan, jolla valvotaan automaatiolaitteita, liikennöintiä eri asemien välillä sekä kaukokäyttöliikennöintiä. Kaukokäyttöliityntänä toimii mSCADA (IEC-850-101). Vesivoimalaitoksen sähköinen suojaus koostuu ohjausjärjestelmän kanssa koordinoitusti toimivasta relesuojauksesta.

## 2.6 Suojareleen kytkentäkuva

Generaattorin suojareleen kytkentäkuvasta nähdään kytkennät virroille, jännitteille sekä laukaisukoskettimille (**Kuva 5.**) Kuvasta ilmenee, että virran mittaus tapahtuu generaattorin tähtipisteen puolelta. Mittaus tuodaan kaapelilla virtamuuntajien navoista riviliittimille, josta se edelleen kytketään itse releen napoihin. Automaatiojärjestelmä ei toimi generaattoreiden sähköisenä suojana, eikä siten suorita katkaisijoiden hätälaukaisua. Suojareleiden toiminnasta (hälytys/laukaisu) saadaan tieto automaatiojärjestelmään.



**Kuva 5.** Generaattorin suojareleen VAMP 210-kytkentäkaavio.

### 3. GENERAATTORI

#### 3.1 Generaattori vesivoimalaitoksessa

Generaattori on pyörivä sähkökone, jonka tehtävänä on mekaanisen energian muuttaminen sähköiseksi energiaksi. Generaattoreita on useita eri tyyppisiä, mutta yleisimmin generaattoreina käytetään etenkin suurilla tehoilla tahtigeneraattoreita./3/

Generaattori on myös yksi voimalaitoksen kalleimmista komponenteista, jonka toimitusaika on suuren käsityöosuuden takia kohtuullisen pitkä. Koska vesivoimalaitosten yksikkökoko vaihtelee satojen megawattien tehoista muutaman kilowatin tehoisiin mikroversivoimaloihin, vesivoimalaitosten rakenneratkaisut vaihtelevat huomattavasti muita voimalatyyppisiä enemmän. Tarkastellaan seuraavaksi vesivoimalaitosten yleisimpiä eri teholuokkien generaattorityyppejä.

Alle 1 MW tehoalueella käytetään nimellisjännitteeltään alle 1 kV:n epätahtigeneraattoreita, jotka ovat turbiinin ryntäysnopeutta vastaavaksi vahvistettuja oikosulkumoottoreita. Oikosulkumoottorin etuja ovat yksinkertainen ja kestävä rakenne, mutta rajoitetut säätöominaisuudet ja sähköverkosta otetun magnetointitehon kompensointitarve estävät käytön laajemmalla tehoalueella.

Yli 1 MW yksikkötehoilla, tai parempaa säädettävyyttä vaativissa kohteissa, käytetään avonaparakenteisia tahtigeneraattoreita, joiden nimellisjännite on tyypillisesti 6 kV - 20 kV. Suoraan turbiinin akseliin kytkettävän pysty akselisen generaattorin pyörimisnopeus on yleensä alle 400 r / min. Hidas pyörimisnopeus, suuri napamäärä ja generaattorin fyysinen koko yhdessä laakeroinnin ja ryntäysnopeuden erityisvaatimusten kanssa, vaativat tapauskohtaista suunnittelua.

Noin 15 MW:n yksikkötehoihin asti generaattorin rakennetta voidaan yksinkertaistaa asentamalla turbiinin ja generaattorin väliin mekaanista pyörimisnopeutta 750 r/min tai 1000 r/min tasolle nostava vaihde. Vesivoimageneraattorien magnetointi toteutetaan joko suoran staattisen tyristorimagnetoinnin tai harjattoman magnetoinnin avulla. Harjattoman magnetoinnin käyttö on aiemmin rajoittunut pääasiassa vaihteella varustettuihin

yksiköihin, mutta nykyisin myös pystyakselisten generaattorien magnetointi voidaan toteuttaa lähes huoltovapaalla harjattomalla magnetoinnilla. Staattisella magnetoinnilla saavutetaan kuitenkin hieman parempi säädettävyys ja hyötysuhde.

Pitkästä käyttöiästä johtuen, generaattori kannattaa varustaa kunnonvalvontajärjestelmällä, joka valvoo generaattorin ja turbiinin tärinää, generaattorin ilmapäliä ja lämpötiloja. Järjestelmä käsittää anturit, mittauslaitteet sekä signaalinkäsittelyn ja -tallennuksen tarvitsemat laitteet. Kehittyneiden jatkuvatoimisten järjestelmien signaalinkäsittelytoiminnot auttavat hitaasti kehittyvien vikojen ennakkoinnissa ja mahdollistavat äkillisten vikojen nopean havaitsemisen. Generaattorin vikoihin ja siitä aiheutuviin kustannuksiin syvennyttään tarkemmin luvussa 4.

### **3.2 Generaattorin suojaus**

Suojareleet on kytketty sähköisesti generaattorin toisiopiireihin. Niiden päätehtävänä on suojata generaattoria, turbiinia ja päämuuntajaa mekaaniselta vaurioitumiselta. Suojalaitteiden käytön laajuus ja suojauksen varmistus on aina tapauskohtaisesti harkittava. Valittava suojaustaso riippuu paitsi koneelle aiheutuvan riskin suuruudesta myös laitoksen koosta ja mahdollisen keskeytysvahingon aiheuttamien seurauksien merkityksestä. /7/

Pääosa generaattorisuojista perustuu sähköisten suureiden mittaukseen. Viat voidaan karkeasti jakaa sisäisiin ja ulkoisiin vikoihin. Sisäiset viat ovat staattorissa ja roottorissa tai magnetointipiirissä esiintyviä, kun taas ulkoiset viat ovat verkossa, blokkimuuntajassa tai turbiinissa esiintyviä vikoja.

Seuraavalla sivulla on listattu yleisimpiä vikoja, jotka on jaettu kolmeen eri kategoriaan: sisäiset ja ulkoiset viat sekä muut viat.

Sisäiset viat:

- staattorin oikosulku (kaksi- tai kolmivaiheinen)
- staattorin ylivirta
- staattorin kierrossulku
- staattorin maasulku
- roottorissa, magnetointipiirissä
- roottorin maasulku (yksin- tai kaksinkertainen)
- roottorin ylijännite, jännitteen nousu
- alimagnetointi (osittainen tai täydellinen magnetoinnin puuttuminen)
- ylimagnetointi (käyttäjän virhe)
- roottorin ylivirta
- roottorin kierrossulku (vaiheen sisäinen oikosulku).

Ulkoiset viat:

Viat verkossa tai muuntajassa

- epäsymmetrinen kuorma
- epätahtikäyttö (kapasitiivinen kuorma, pitkä oikosulun kesto)
- maasulku
- oikosulut
- ylikuormitus
- alitaajuus
- siirtoverkon häiriötilanteesta johtuva tehonheilahtelu.

Viat turbiinissa tai säätäjässä

- takateho (voimakoneen tippuminen)
- yli- ja alijännite
- yli ja alitaajuus
- ylimagnetointi (säätäjä virhe).

Lisäksi:

- tahaton syötön kytkentä, epätahtikytkeä
- tännitemittauspiirin vika
- generaattorikatkaisijan vika
- laakerivirta
- jäähdytysjärjestelmän toimintahäiriöt
- tulipalo.



### 3.3 Generaattorin suojarleen VAMP 210, suojausfunktiot

Käydään läpi generaattorin eri suojaustoiminnot käyttäen esimerkkinä Kaaranneskosken vesivoimalaitosta ja siellä generaattorisuojaukseen käytettyjä suojausfunktioita.

Generaattorin nimellisarvot:

- näennäisteho  $S_{GEN} = 3100 \text{ kVA}$
- akseliteho  $P_m = 2720 \text{ kW}$
- tehokerroin  $\cos \varphi = 0,8$
- nimellisjännite  $U_{GEN} = 6,3 \text{ kV}$
- nimellipyörimisnopeus  $n = 333 \text{ r/min}$
- ryntäysnopeus  $n_{r \max} = 666 \text{ rpm}$
- pitkittäisalkureaktanssi  $x_{d''} = 0,200$
- pitkittäistahtireaktanssi  $x_d = 1,090$
- turbiinin akseliteho  $P_a = 2720 \text{ kW}$
- tähtipistejännitemuuntaja  $6000 \text{ V} / \sqrt{3} / 100 \text{ V}$ .

Näitä nimellisarvoja käyttämällä saadaan laskettua seuraavia arvoja:

Pätöteho:

$$P = S_{GEN} * \cos \varphi = 2480 \text{ kW} \quad (1)$$

Loisteho:

$$Q = S_{GEN} * \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} = 1860 \text{ kvar} \quad (2)$$

Generaattorin nimellisvirta:

$$I_{GEN} = \frac{S_{GEN}}{\sqrt{3} * U_{GEN}} = 284 \text{ A} \quad (3)$$

Impedanssi:

$$Z_n = \frac{U_{GEN}^2}{S_{GEN}} = 12,803 \Omega \quad (4)$$

Pitkittäisalkureaktanssi:

$$X_d'' = x_d'' * Z_n = 2,56 \Omega \quad (5)$$

Alkuoikosulkuteho:

$$S_k'' = \frac{S_{GEN}}{x_d''} = 15,5 \text{ MVA} \quad (6)$$

Alkuoikosulkuvirta:

$$I_k'' = \frac{S_k''}{\sqrt{3} * U_{GEN}} = 1,42 \text{ kA} \quad (7)$$

Suojareleen virtaskaalaus:

- virtamuuntajan ensiöarvo  $I_{pri}$ : 300A
- virtamuuntajan toisioarvo  $I_{sec}$ : 5A
- $I_0$  Virtamuuntajan ensiöarvo: 1A
- $I_0$  Virtamuuntajan toisioarvo: 1A.

Suojareleen jänniteskaalaus:

- jännitemuuntajan ensiöarvo  $U_{pri}$ : 6000V
- jännitemuuntajan toisioarvo  $U_{sec}$ : 100V
- jännitemuuntajan  $U_0$  toisiossa  $U_{0sec}$ : 105V
- jännitteen mittaustapa  $U_{mode}$ : 2LL+ $U_0$ .

### 3.3.1 Ylivirtasuojaja [I>] (50/51)

Ylivirtasuojaus on kolmivaiheinen ja sisältää kolme erikseen aseteltavaa porrasta: I>, I>> ja I>>>. Ensimmäisessä suojaportaassa I> käyttäjän on mahdollista valita laukaisukäyrät DT (definite time) tai IDMT käänteinen toiminta-aika. Suojan toiminta perustuu vaihevirtojen perustajuisen toiminnan mittaukseen. Ylivirtasuojaja toimii generaattorin primäärisenä oikosulkusuojana.

Ylivirtasuojaa käytetään esimerkiksi verkkohäiriössä, mikäli eroonkytkentä ei toimi generaattorin suojauksen kannalta riittävän nopeasti. Ylivirtasuojan toiminnan varmistaminen myös generaattorin sisäisissä tai lähivioissa edellyttää, että virtojen mittaus otetaan releelle tähtipisteen virtamuuntajista. Kaikki generaattorit, niin pienet kuin suuretkin, tulee varustaa ylivirtasuojauksella. Ylivirtasuojan ensisijainen tehtävä on suojata generaattoria: ulkoisissa oikosuluissa, verkon ylikuormitustilanteissa, sisäisissä käämisuluissa vaiheiden välillä sekä ylikuormitussuojan ja oikosulkusuojan varasuojana. Ylivirtaportaat aseteltiin Kaaranneskoskella seuraavilla asetuksilla:

I> :  $1,15 \cdot I_{GEN} = 327A$  (Ensiö);

:  $327A \cdot 5/300A = 5,45A$  (Toisio); Toimintaviive:2s; DT

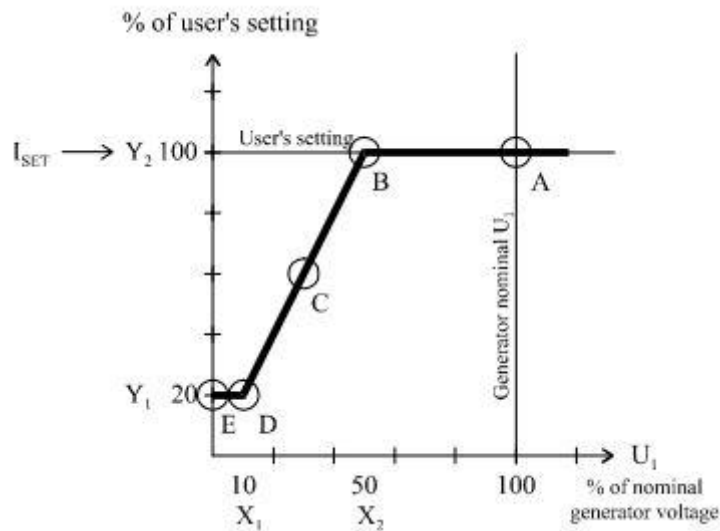
I>> :  $2,00 \cdot I_{GEN} = 568/9,467A$ ; Toimintaviive:0,3s

### 3.3.2 Jänniteohjattu ylivirtasuojaja [Iv>] (51V)

Jännitesäädetyllä ylivirtafunktiolla on oma ylivirtaportaansa Iv>. Sitä käytetään generaattorin oikosulkusuojakseen silloin, kun generaattorin staattinen magnetointilaitteisto ottaa syöttönsä generaattorin navoista. Käytettäessä yllämainittua magnetointitapaa, täytyy oikosulkusuojaus varmentaa esim. jännitesäädetyillä ylivirtafunktioilla, koska generaattorin lähioikosulussa ensisijainen ylivirtasuojaja ei välttämättä ehdi toimia oikosulunvirran nopean vaimenemisen takia. /2/

Generaattorin napajännitteen laskiessa alle asetellun jännitetason, lähtee ylivirtaportaan Iv> havahtumistaso pienenemään lineaarisesti jännitteen aleneman

funktiona kuvassa 6 olevan ominaiskäyrän mukaisesti. Mikäli asetteluparametrit on valittu kuvan mukaisesti, puhutaan jänniteohjatusta ylivirtaportaasta. /2/



**Kuva 6.** Jännitesäädetyin ylivirtaportaan  $I_v >$  ominaiskäyrä.

Jännitesäädetyin ylivirtaportaan suojausasetukset aseteltiin seuraavasti:  $1,2 \cdot I_{GEN} = 341/5,682A$ ; Toimintaviive: 0,5s; Jänniteohjauksen alkuarvo:  $X_1 = 20\%$ ; Jänniteohjauksen loppuarvo:  $X_2 = 80\%$ ; Jännitettä  $X_1$  vastaavan virran asetteluarvo:  $Y_1 = 20\%$ ; Jännitettä  $X_2$  vastaavaa virran asetteluarvo:  $Y_2 = 100\%$ . Seuraavaksi lasketaan kuvan 6 käyrältä toimintapisteiden B, C, D ja E teoreettiset jännitteet ja virrat.

Pisteen B laskenta:

$$I_{setPri} = 1,2 \cdot 284A = 340,8A \quad (8)$$

$$I_{inj} = 340,8A \cdot \frac{5}{300}A = 5,68A \quad (9)$$

Pisteen C laskenta:

$$U_{inj} = 0,5 \cdot 60,5V = 30,3V \quad (10)$$

$$I_{inj} = 0,6 \cdot 5,68A = 3,4A \quad (11)$$

Pisteen D laskenta:

$$U_{inj} = 0,2 * 60,5V = 12,1V \quad (12)$$

$$I_{inj} = 0,2 * 5,68A = 1,14A \quad (13)$$

Pisteen E laskenta:

$$U_{inj} = 0V \quad (14)$$

$$I_{inj} = 0,2 * 5,68A = 1,14A \quad (15)$$

### 3.3.3 Vinokuormitussuoja [ $I_2>$ ] (46)

Tarkoituksena on tunnistaa generaattorin epäsymmetrinen kuormitus ja estää sen aiheuttamia lämpövaurioita generaattorin roottorille. Vinokuormitussuoja pelkistää vaihevirroista symmetristen komponenttien laskennan avulla virran vastakomponentin  $I_2$ . Tätä virtakomponenttia käytetään vinokuormitusfunktion toiminta-ajan laskentakaavassa: Vinokuormitussuoja on tyypiltään vakioaikatoimintainen ja käyttötavaltaan hälyttävä. /2/

Vinokuormituksessa indusoituu roottoriin, varsinkin sen vaimennuskäämitykseen ja sen massiivisiin osiin staattorivirran vastakomponentin synnyttämiä pyörrevirtoja, jotka aiheuttavat voimakasta lämpenemistä, tärinää, jopa kipinäintiä. Suojaa generaattoria: staattoripiirin sisäiset vaihekatkokset, ulkoiset vaihekatkokset, epäsymmetriset kuormat. /8/

Vinokuormitussuojan asettelu toteutetaan asettelemalla virran vastakomponentti suhteessa  $I_{GEN}$ :aan prosentteina. Tässä suojassa käytetään arvoja:  $I_2>$ : 15 %; viiveaika: 5s havahtumisrajan virta-arvot ensiö:

$$I_{setPri} = 0,15 * I_{GEN} = 42,5A \quad (16)$$

Toisio:

$$I_{setSec} = \frac{I_{setPri}}{\frac{300}{5}} = 0,71A \quad (17)$$

Havahtumisraja:

$$I_{inj} = 3 * 0,71A = 2,13A \quad (18)$$

### 3.3.4 Nollavirtasuojaja [ $I_0$ ] (50N/51N)

Sovelluksissa, joissa käytetään maadoitusmuuntajaa, on mahdollista toteuttaa maasulkusuojaus pelkällä maasulkusuojan ylivirtaportaalla  $I_{01}$ . Maasulkusuojan ylivirtafunktio on kaksi aseteltavaa porrasta.  $I_{01>}$  ja  $I_{01>>}$ , joilla kummallakin on oma viiveasettelunsa. Alempi porras  $I_{01>}$  voi käyttää joko vakioaikaviivettä  $\mu$  jotain IEC:n mukaista virrasta riippuvaa käänteisaikakäyrää, kuten normaali ylivirtaporras  $I>$ , ks. kappale 3.2.1. Maasulkuportaan  $I_0>$  käänteisaikakäyrät ovat vastaavia kuin ylivirtaportaan  $I>$ . Käyräparven laskentakaavoissa käytetään termin  $(I/I>)$  sijasta  $(I_0/I_0>)$ . /2/

Kaaranneskosken  $I_0>$  porras toimii roottorin maasulkusuojana. Primääriasetusarvona,  $I_0>$  portaassa: 0,015(=15mA)p.u ; viive:1s; DT.

### 3.3.5 Nollajännitesuojaja [ $U_0$ ] (59N)

Blokkimuuntajakytketyn generaattorin staattorin maasulkusuojaus toteutetaan tyypillisesti maasulun nollajännitteen ylijännitefunktioilla. Nollajännitteen mittaussuoritetaan generaattorin nollapistemuuntajalla tähtipisteen ja maan välillä. Maasulun nollajännitefunktioilla on aseteltavissa kaksi ylijänniteporrasta. Kummallekin portaalte on oma aseteltava vakioaikaviive. /2/

Nollajännitesuojaja toimii herkän maasulkusuojan varasuojana. Nollajännitesuojaja

- + on staattorin tärkein maasulkusuojaja
- + toimii käynnistysvaiheen aikana heti kun magnetointia kytketään päälle
- + sopii blokkikytkennässä, jossa jokaisella generaattorilla on oma päämuuntaja
- epäselektiivinen, jos samaan kiskoon on kytketty useita generaattoreita

- epäselektiivinen, jos generaattori on suoraan liitetty jakeluverkkoon.

Nollajännitesuojassa käytettiin seuraavia asetteluja:  $U_{0>}$ : 20% viive: 0,5s. Alempi porras  $U_{0>>}$ : 40% viive:0,3s. Asetusarvot suhteessa nimellisarvoon  $U_{0sec}$ .

$$U_{inj} = 0,2 * U_{VTSec} = 20V \quad (19)$$

$$U_{inj} = 0,4 * U_{VTSec} = 40V \quad (20)$$

### 3.3.6 Ylijännitesuoja [ $U>$ ] (59)

Ylijännitesuoja on kolmivaiheinen ja kaksiporainen:  $U>$  ja  $U>>$ . Kummallakin portaalla on oma asetettava vakioaikaviive. Mittaus perustuu pääjännitteiden perustaajuiseen komponenttiin, josta aina suurimman arvoa verrataan ylijännitesuojan asetteluarvoon./2/

Ylijänniteporras suojaa staattorikäymistä käyttäajaisilta ylijännitteiltä sekä staattorin sydänlevypakettia ylimagnetoinnilta. Ylijännitteen havahtumistaso ja toiminta-aika tulee sovittaa yhteen jännitteen säätäjän ominaisuuksien kanssa siten, että annetaan säätäjälle aika toimia esim. kuormanpudotuksen yhteydessä, turhien laukaisujen ja hälytyksien välttämiseksi. Ylijännitteen toimintaraja tulee asettaa sille tasolle, ettei venttiilisuoja jää johtavaan tilaan, jolloin erovirtasuojaa havahtuu. Ylijännitteitä aiheuttaa magnetointi ja jännitesäätäjähäiriöt, voimakoneen ryntäys turbiinisäätäjähäiriön takia, kuormanpudotuksesta johtuvat jännitteen nousut, verkkohäiriöt, tyhjäksiävän johdon kapasitanssit. /8/

Ylijännitesuojan asetusarvoiksi laitettiin,  $U>$ : 110%; viive:1s. Ylijännitesuojaportaalalle  $U>>$ :125%; viive: 0,10s

$$U_{secGEN} = U_{GEN} \quad (21)$$

$$U_{>inj} = 1,1 * U_{secGEN} = 115,5V \text{ (toisiojännite)} \quad (22)$$

$$U_{>>inj} = 1,25 * U_{secGEN} = 131,3V \text{ (toisiojännite)} \quad (23)$$

### 3.3.7 Alijännitesuoja [ $U<$ ] (27/60)

Alijännite on kolmivaiheinen ja kaksiporainen:  $U<$  ja  $U<<$ . Kummallakin portaalla on oma aseteltava vakioaikaviive. Mittaus perustuu jännitteen myötäkomponentin perustaajuiseen osaan, jolloin toiminta on tunteeton maasulun ja kaksivaiheisen oikosulun aiheuttamille epäsymmetrisille jännitteille. Alijänniteporras on lukittavissa ulkoisella digitaalitulolla esim. jos mittausspiirin toisiojännite katoaa, (varoke laukeaa) tai sisäisesti aseteltavalla lukitussignaalilla.

/2/

Alijännitesuoja voi olla osa irtikytkentäautomaatiikasta ylikuormitus- ja jälleenkytkentätilanteissa, usein yhdessä taajuussuojan kanssa. Alijännitesuoja suojaa generaattoria magnetointi- ja jännitesäätäjä häiriöissä, ylikuormituksesta johtuvista alijännitteistä, verkkohäiriön yhteydessä esiintyviä alijännitteitä vastaan.

$$U_{inj} < = U_{set} < * U_{GENSec} = 94,50 V \quad (24)$$

$$U_{inj} << = U_{set} * U_{GENSec} = 84 V \quad (25)$$

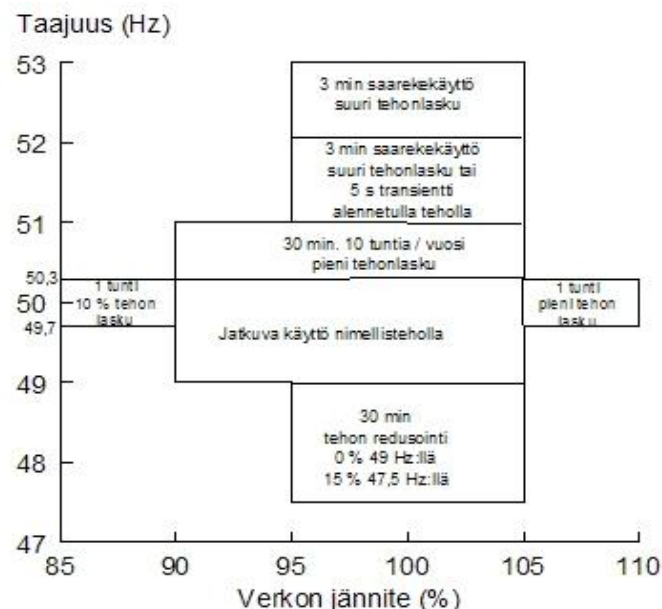
Alijännitesuojissa käytettiin asetteluja:  $U_{set}<$ :90%; viive:2s.  $U_{set}<<$ :80%; 0,5s



### 3.3.8 Taajuussuojat (81H/81L)

Taajuuspoikkeama normaalikäytön aikana on kantaverkkohäiriön merkki. Yli 50MW laitoksille asettaa Fingrid/Nordel tarkat taajuus- ja jännitehäiriökestoisuusvaatimukset./8/

Voimalaitosten tulee toimia jatkuvasti täydellä teholla taajuusalueella 49-51Hz, verkkojännitteen ollessa alueella 90-105 %. Yksittäisissä häiriöissä voimalaitoksen tulee toimia tunnin ajan verkkojännitteen ollessa 85-90 %, kun taajuus vaihtelee välillä 49,7-50,3Hz. Tehon sallitaan pienenevän enintään noin 10 % täydestä tehosta. Kuvassa 7 Fingridin asettelemat vaatimukset teholle jännitteen ja taajuuden vaihdellessa. /3/



**Kuva 7.** Tehon tuotannolle asetetut vaatimukset verkon taajuuden ja jännitteen vaihdellessa. /3/

Pienet laitokset, jotka ovat liitettynä paikalliseen jakeluverkkoon, halutaan yleensä häiriötilanteissa saada nopeasti irti verkosta. Varsinkin jos ne eivät ole säätöominaisuuksiltaan saarekekäyttökelpoisia. Niiden tulee kytkeytyä irti verkosta viimeistään aikajälleenkytkennän aikana jännitteettömänä, jotta maasulut ja valokaaret saadaan sammumaan, ennen kuin jännite palaa takaisin.

Generaattorin taajuussuoja vapautetaan vasta, kun generaattorikatkaisija on suljettu, jotta se ei pääse häiritsemään käynnistys- ja pysäytysseksenssejä. /8/

*Ylitaajuussuoja [fX] (81)* toimii, jos generaattorin taajuus nousee yli sallitun tason, esimerkiksi äkillisen kuormanpudotuksen seurauksena. Myös generaattorin säätöjärjestelmä saattaa vioittua ja aiheuttaa generaattorin taajuuden nousun liian suureksi. Taajuusmittauksen resoluutio on 0,01Hz ja suojafunktiossa on yksi asetettava taajuusporras. Taajuuspoikkeama normaalikäytön käytön aikana on kantaverkkohäiriön merkki. Ylitaajuussuoja suojaa konetta turbiinisäätäjähäiriöissä. Se toimii ryntäyssuojana kun generaattorikatkaisija on kiinni. Ylitaajuussuoja kytkee generaattorin irti verkosta ylituotantotilanteissa ja on osa eroonkytkentäautomaatikasta verkkohäiriöissä /8/

Kaaranneskosken ylitaajuussuojan asetteluina käytettiin seuraavia asetteluita: fX: Havahtumisarvo: 50,5Hz; viive:1s Jännitelukitus: 40%  $U_{GEN}$ . Taajuussuojaportaalte fXX: 51Hz; viive:0,3s Jännitelukitus: 40%  $U_{GEN}$ .

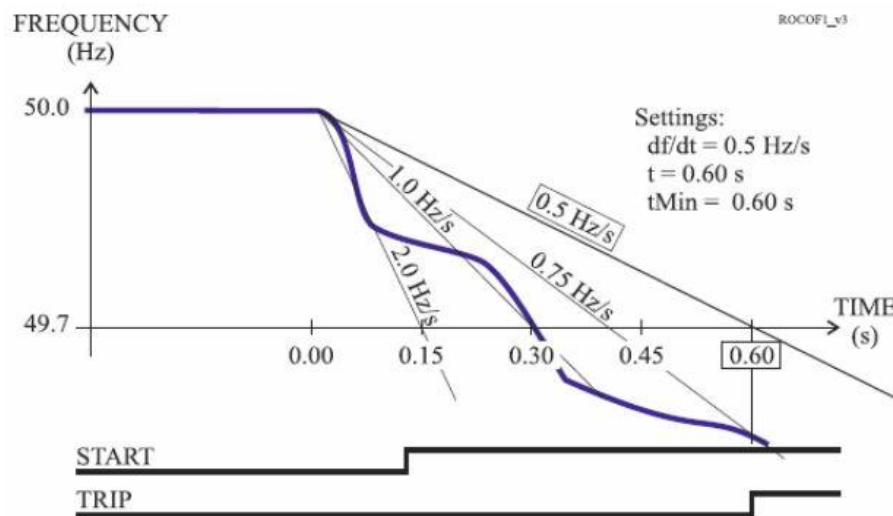
*Alitaajuussuoja [f<] (81L)* sisältää kaksi toisistaan riippumatonta aseteltavaa porrasta. Kummankin asetteluressoluutio on 0,01Hz ja molemmilla portailla on oma vakioaikaviiveasettelu. Jos tarvitaan nopeaa irtikytkentymistä, esimerkiksi eroonkytkentätilanteessa, voidaan molemmat portaat asettaa toimimaan minimissään 100 ms:n hidastuksella. Alitaajuussuoja suojaa konetta samoissa tilanteissa kuin ylitaajuussuoja. Alitaajuussuoja lukitaan myös jännitepiirin varokeautomaatin apukoskettimella, muuten suoja laukeaa kun varokeautomaatti avataan. /8/

Alitaajuussuojan f< asettelut: Havahtumisarvo: 49,5Hz; viive:1s; jännitelukitus: 40%  $U_{GEN}$ . f<<: 49Hz; 0,3s

### 3.3.9 Taajuusmuutossuoja [df/dt] (81R)

Taajuusmuutossuojaa käytetään nopeana eroonkytkentäsuojana (saarekekäytön tunnistus / anti islanding / loss-of-Mains) verkoissa, joissa jälleenkytkentä on käytössä. Päättarkoituks on estää tahtigeneraattorin tahdistamaton jälleenkytkentä, joka pahimmassa tapauksessa vastaa napaoikosulkua ja rasittaa mekaanisesti

myös voimakonetta ja varsinkin vaihdelaatikkoo. Keskijänniteavojohtoverkkoon hajautettu sähkövoimantuotanto jää joksikin aikaa syöttämään, esim. maasulun aiheuttamaa valokaarta, jonka takia pikajälleenkytkentä todennäköisesti epäonnistuu. Jos laitos saadaan erotettua verkosta 300 ms sisällä, on kuitenkin edellytyksiä, että aikajälleenkytkentä onnistuu. Kuvassa 8 esimerkki  $df/dt$ :n toiminnasta. /8/

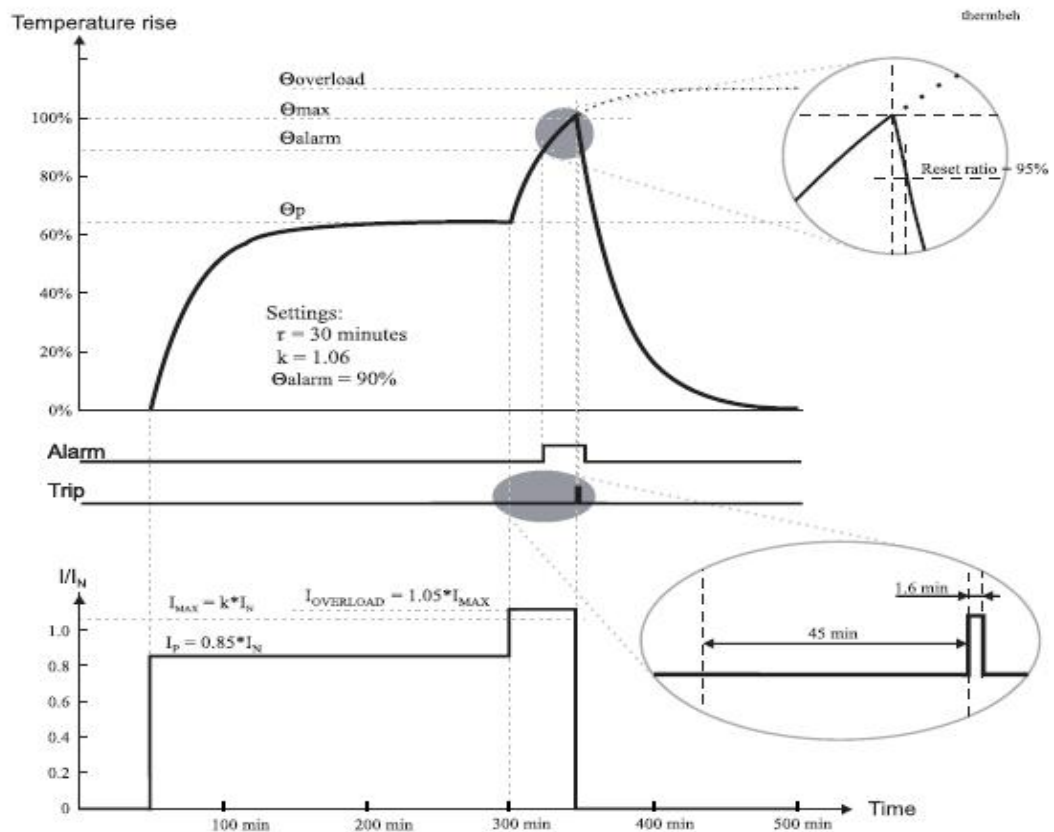


**Kuva 8.** Esimerkki  $df/dt$  suojan toiminnasta. 0,6s kohdalla mikä on viiveaika. Taajuus laskee keskimääräisesti 0,5Hz/s ja laite luo trip signaalin.

Kaaranneskoskella käytettiin asetteluaroja: havahtumisarvo:1,0Hz/s; viive:1,2s.

### 3.3.10 Ylikuormitussuoja [T>] (49)

Ylikuormitussuoja on yksiportainen. Mittaus perustuu vaihevirtojen perustaajuiseen komponenttiin, josta lasketaan suojattavan kaapelin lämpenemää. Suoja havahtuu, kun laskettu lämpenemä ylittää asetellun rajan  $T >$  asetellun aikavakion ( $\varphi$ ) kuluessa. Kuvassa 9 Ylikuormitussuojan ominaiskäyrä. Suojaan sisältyy myös aseteltava hälytysraja.



**Kuva 9.** Ylikuormitussuojan ominaiskäyrä.

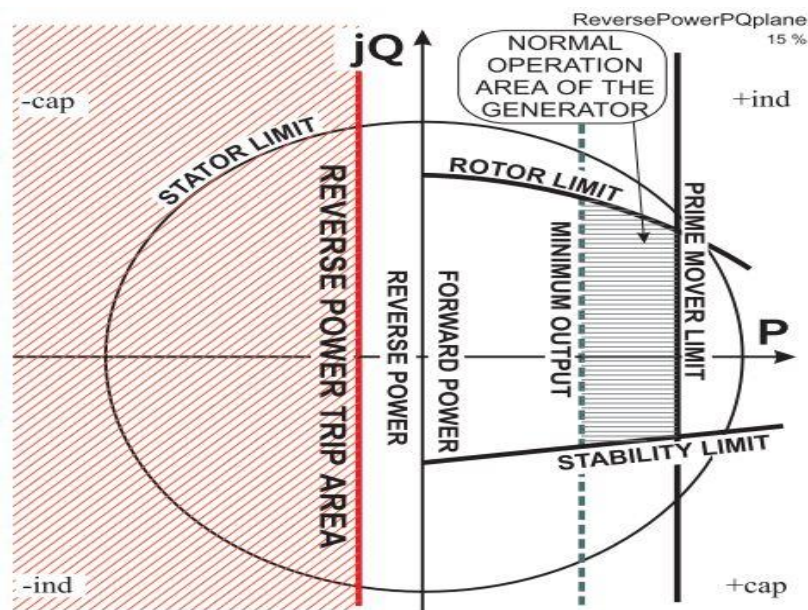
Käytetään ylikuormitusportaassa seuraavia asetteluja: Temperature rise: 42%; Maximum continuous current:  $1.05 * I_{GEN}$ ; Alarm setting: 90%; Time constant  $\varphi$ : 60min; Max overload at  $+40^{\circ}\text{C}$ : 100% ( $\%I_{GEN}$ ); Max overload at  $+70^{\circ}\text{C}$ : 78% ( $\%I_{GEN}$ )

$$t = \tau * \ln \frac{I^2}{I^2 - (kI_{GEN})^2} = 1,63934 \quad (26)$$

$$1,63934 = 1:38min \quad (27)$$

### 3.3.11 Takatehosuoja [P<] (32)

Takatehosuoja mittaa generaattorin tehoa kolmivaiheisesti ja sen tarkoituksena on suojata generaattoria pyörittävää voimakonetta tilanteissa, joissa generaattori muuttuu moottoriksi ja pyrkii pyörittämään voimakonetta. Jos takatehosuoja on erillinen suojarele, tulisi virtaviesti ottaa virtamuuntajien mittaussydäimestä herkkyyden parantamiseksi. Turbogeneraattoreiden takatehosuojista vaaditaan jopa 0,1 % havahtumiskynnystä. Ensimmäisen portaan laukaisuviive on aika pitkä, jotta vältetään turhia laukaisuja käynnistyssekvenssin aikana. Koska esimerkiksi vesivoimakoneen teho laskee tyypillisesti aluksi, avausta lisätään kunnes vesimassat ovat lähteneet liikkeelle. Kun turbiinin aksiaalivoiman suunta muuttuu, voi pienikin takateho olla tuhoisa aksiaalilaakereille. Pystyakselisissa vesiturbiinissa juoksupyörä ”surffaa” veden päällä ja nostaa mukaansa roottorin, joka voi vahingoittaa Kaplan-turbiinien öljynjakopesää. Poikkeuksena tästä muodostaa ne muutamat suuret vesivoimalaitokset, jotka toimivat synkronikompensoattorina ja pyörivänä reservinä. Niissä puhalletaan ilmaa juoksupyöräkammioon niin, että juoksupyörä pyörii kokonaan ilmassa, kun generaattori toimii moottorina.



**Kuva 10.** Takatehosuojan havahtumisalue *Reverse Power Trip Area*.

Takatehon asetteluina käytettiin arvoja:  $P <: -2,0\%P_m(-54kW)$ ; viive:10s Alemman portaan  $P <<: -4,0\%P_m(-109kW)$ ; viive:2,0s

Toisiovirta vastaava joka vastaa nimellisteho:

$$I_{PMSec} = \frac{P_m}{S_{GEN}} * I_{GENSec} = 4,653 A \quad (28)$$

Havahtumisvirta asettelulla -2%:

$$I_{inj} = -P_{set} * \sqrt{3} * I_{PMSec} = 0,16 A \quad (29)$$

Releen pitäisi havahtua viimeistään:  $\pm 20\% = 0,128... 0,192A$

Havahtumisvirta asettelulla -4%:

$$I_{inj} = -P_{set} * \sqrt{3} * I_{PMSec} = 0.322 A \quad (30)$$

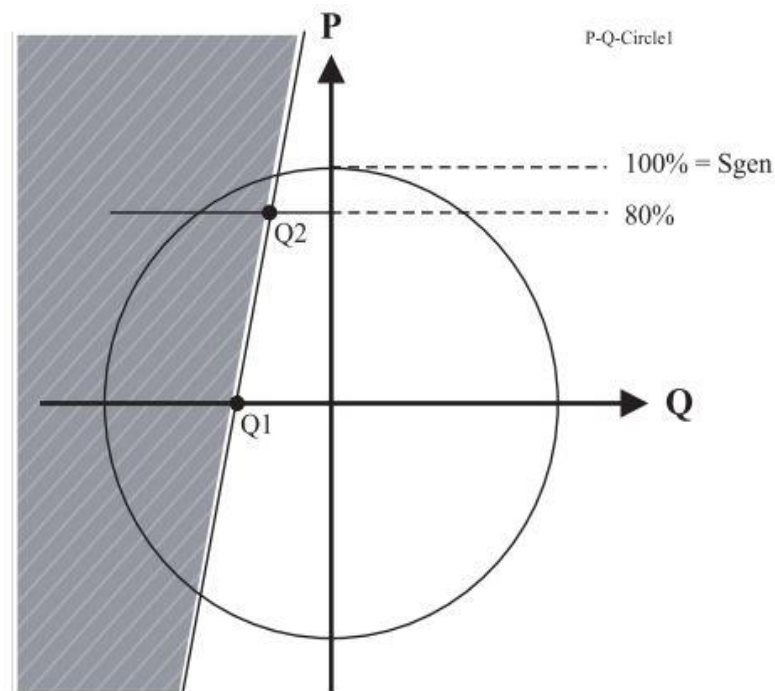
Laskennallinen asettelu takateho:

$$P_{SET} <= 2\% * P_m = 54 kW \quad (31)$$

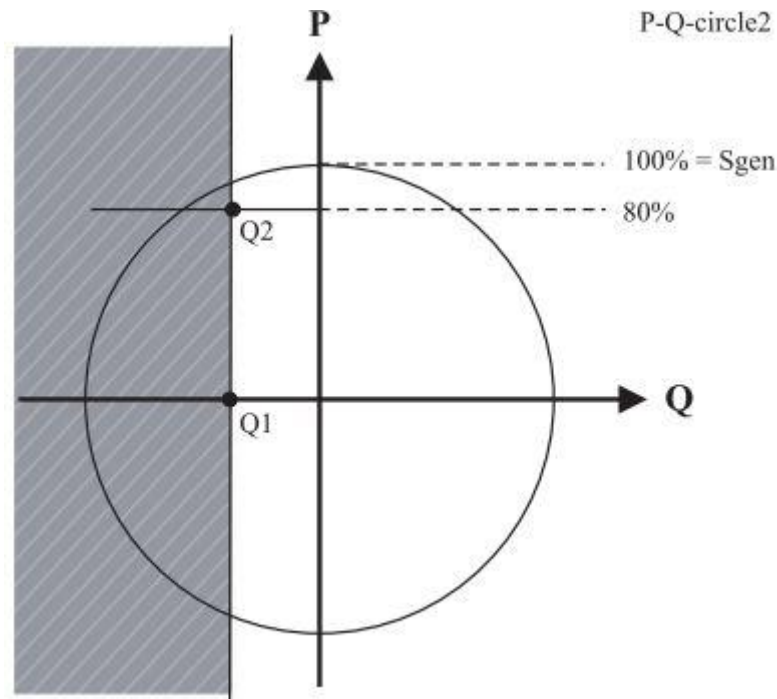
$$P_{SET} <<= 4\% * P_m = 109 kW \quad (32)$$

### 3.2.12 Alimagnetointisuoja $Q < (40)$

Alimagnetointisuoja mittaa jännitettä ja virtaa, laskien niistä kolmivaihetehon. Alimagnetointisuoja suojaa tahtigeneraattoria, ja myös verkkoa laukaisten generaattorin irti verkosta, jos se on vaarassa pudota pois tahdist. Kun lähtevä teho on kapasitiivista, eli tehovektorin loiskomponentti on negatiivinen, saattaa roottorin magnetointivirta olla niin pieni, että synkronointi roottorin ja staattorin välillä voidaan menettää. Magnetointiasteen mittaaminen perustuu kompleksiseen kolmivaihetehovektoriin, joka lasketaan Aron-kaavalla vaihevirtojen ja pääjännitteiden perusaaltokomponenteista. Suojan laukaisuraja asetellaan PQ-tasossa parametreilla  $Q1$  ja  $Q2$ . Kun tehovektorin kärki on P-akselin vasemmalla puolella ja osuu lisäksi pisteiden  $Q1$  ja  $Q2$  kautta kulkevan suoran vasemmalle puolelle, alimagnetointiporras havahtuu. (Kuvat 11-12.) /2/



**Kuva 11.** Alimagnetoinnin asettelut käyttäen parametreja  $Q1$  ja  $Q2$ . Harmaa alue kuvaa toiminta-aluetta. Tässä kuvassa toiminta riippuu molemmista  $P$  ja  $Q$  arvoista, koska toimintasuora on kallistettu  $8^\circ$  /2/



**Kuva 12.** Alimagnetoinnin asettelut Q1 ja Q2 parametrien avulla. Viivoitettu alue kuvaa toiminta-alueita. Kuvan toiminta riippuu pelkästään loistehosta, koska toimintasuoja ei ole kallistettu./2/

Yleisin syy generaattorin palamiseen on alimagnetointi. Eli kun magnetointi pienenee, heikkenee magneettikenttä, joten napakulma kasvaa ja lopuksi generaattori putoaa tahdistaa. Ylivirtasuojia voi mahdollisesti havahtua. Jos verkko on heikko, voi napajännite laskea niin, että myös alijännitesuoja laukeaa. /8/

Jos magnetointi häviää kokonaan, generaattori jää pyörimään epätahtigeneraattorina vaimennuskäämityksen varassa (jos sillä on sellainen). Vaimennuskäämi, eli roottorin napojen pintaan upotettu häkkikäämitys, lämpenee nopeasti, ja sytyttää puolen tunnin sisällä generaattorin palamaan, ellei joku lämpösuojia ole sitä ennen havahtunut. /8/

Epätahtikäyttö saa aikaan voimakkaita virta- ja jännitesysäyksiä niin staattorissa kuin roottorissakin, lisäksi se aiheuttaa huomattavia mekaanisia rasituksia turbiinin ja generaattorin väliseen kytkentään ja perustuksiin. Alimagnetoinnista johtuvat hajakentät aiheuttavat suurilla generaattoreilla levypakettien päätyosien lämpötilojen nousua. Generaattorikatkaisija laukaisee heti, jos kenttäkatkaisija



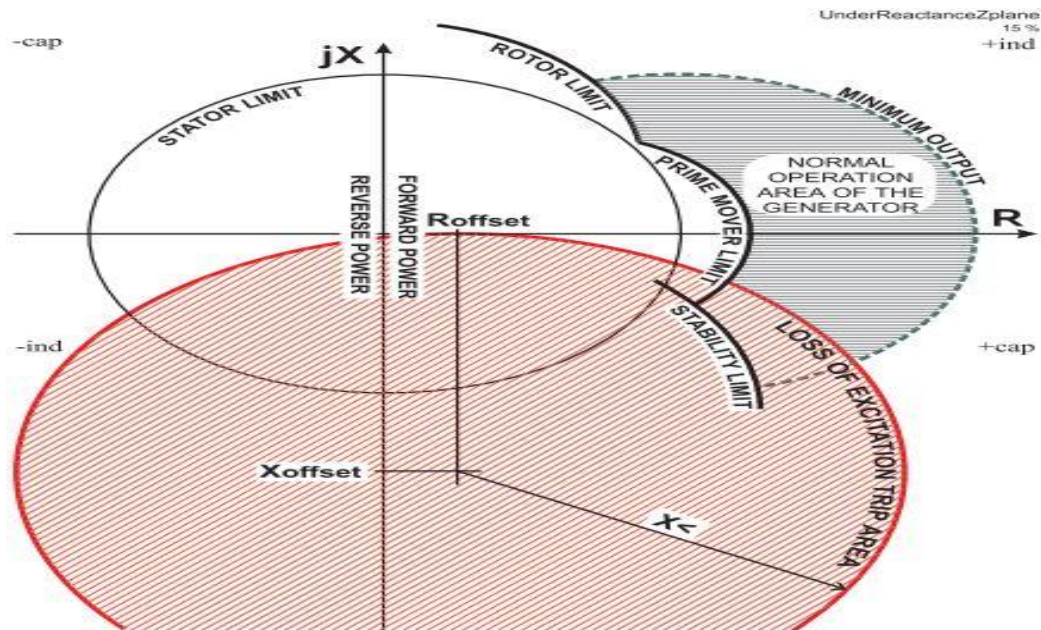
avataan käytön aikana (kenttäkatkaisijan apukoskettimilta suorat laukaisupiirit generaattorikatkaisijalle)./8/

Alimagnetointisuoja asetuksina käytettiin seuraavia asetuksia: Q1:  $-20\%S_{GEN}$ ; Q2:  $-5\%S_{GEN}$ ; viiveaika: 2s. Alimagnetointi porras  $P=0\%$  testattiin jännitteen ollessa nimellinen. Virtaa lähetään nostamaan nolasta, virran kulman ollessa 0. Tehon ollessa 80 % virta ja kulma etsitään käsin. Trip-taso etsitään ”käsin”.

### 3.2.13 Alireaktanssisuoja $X < (40)$

Alireaktanssisuoja on paras ja kallein suoja. Kun magnetointia ei ole tai se on liian pieni, voi generaattori pudota tahdistasta. Alireaktanssiportaatt  $X <$  ja  $X <<$  käytännössä valvovat, että kone toimii tahdissa stabiililla alueella. Jos generaattori putoaa tahdistasta, pyörii vektori, toisin sanoen suojassa tulee sen takia olla summain, joka laskee yhteen kokonaisajan, jolloin vektori on ollut laukaisualueella.

Laukaisuaika-asetukset kannattaa asetella pitkittyneitä tehon heilahduksia vastaan. Tehon heilahtelutilanteessa tehovektorit heiluvat edestakaisin, induktiivisen ja kapasitiivisen tehoalueen välillä. Suoja tarvitsee yhden vaihevirran ( $I_{L1}$ ) ja toisen vaiheiden välisen pääjännitteen ( $U_{L2}-U_{L3}$ ) mittaamiseksi. Havahtumisympyrän kokoa määräävät generaattorin tahtireaktanssi  $X_d$  ja muutosreaktanssi  $X_d'$ . Kuvassa 13 suojaportaan havahtumisympyrä.



**Kuva 13.** Havahtumisympyrä. Kuvassa punainen trip-alue käsittää generaattorin epävakaan toiminta-alueen. Säde  $X_{<}$  ja keskipiste  $[R_{offset}, X_{offset}]$  ovat aseteltavia parametreja. Kun impedanssi laskee  $X_{<}$  ympyrän sisälle, rele havahtuu. /2/

Releen asetteluarvot laskettiin käyttäen Kaarannoskosken generaattorin nimellisarvoja  $S_{GEN}$ ,  $U_{GEN}$ ,  $x_d''$  ja laskettua edellä laskettua arvoa  $Z_n$

$$X_d[ohm] = Z_n * X_d = 13,955 \Omega \quad (33)$$

$$X_{<}[ohm] = \frac{X_d[ohm]}{2} = 6,978 \Omega \quad (34)$$

$$X_{PU} = \frac{X_{<}[ohm]}{Z_n} = 0,545 p.u \quad (35)$$

$$R_{os}[ohm] = 0,14(2,561 + 6,978) = 1,335 \Omega \quad (36)$$

$$R_{offset} = \frac{R_{os}[ohm]}{Z_n} = 0,104 \Omega \quad (37)$$

$$X_{os}[ohm] = -(2,561 + 6,978) = -9,531 \quad (38)$$

$$X_{offset} = \frac{X_{os}[ohm]}{Z_n} = -0,745 \quad (39)$$

Asetteluarvoiksi saatiin alireaktanssisuojaan:

$$X_{<}:0,545; R_{offset}:0,104; X_{offset}:-0,745$$

Suojaportaan testaamiseksi laskettiin myös laskennalliset laukaisuarvot toisiopuolella. Seuraavaksi testataan kuvan 14 pisteet P1 ja P2.

$$X_{<_{prim}}[ohm] = X_{<} * Z_n = 6,98 \quad (40)$$

$$X_{offset\_prim}[ohm] = X_{offset} * Z_n = -9,538 \quad (41)$$

$$P1 = X_{offset} - X_{<} = 2,56 \quad (42)$$

$$U_{variable} = P1 * I_{sec} = 12,8 V \quad (43)$$

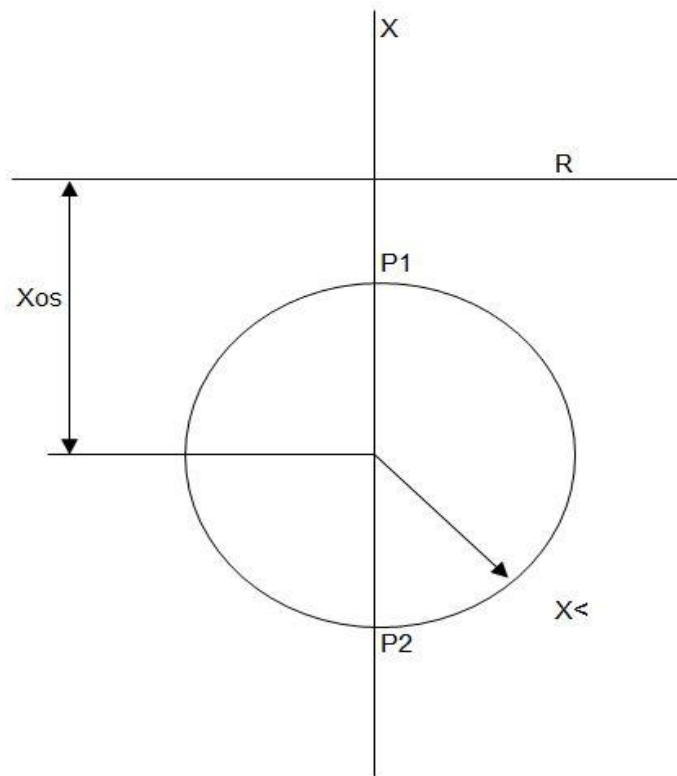
$$P2 = X_{offset} + X_{<} = 16,52 \quad (44)$$

$$I_{variable} = \frac{U_{sec}}{P2} = 3,5 A \quad (45)$$

Edellä lasketuilla asetteluarvoilla saatiin havahtumisrajaksi P1 pisteeseen  $U_{variable}$ : 12,8 V ja pisteeseen P2  $I_{variable}$ : 3,5 A. Seuraavassa luvussa esitetään yksityiskohtaisesti testauksen asettelujen luonti ISA DRTS-6 laitteelle *Test and Data Management* sovelluksessa ja sen eri vaiheet.

### 3.2.14 Alireaktanssisuojan testaus ISA DRTS-6 laitteella

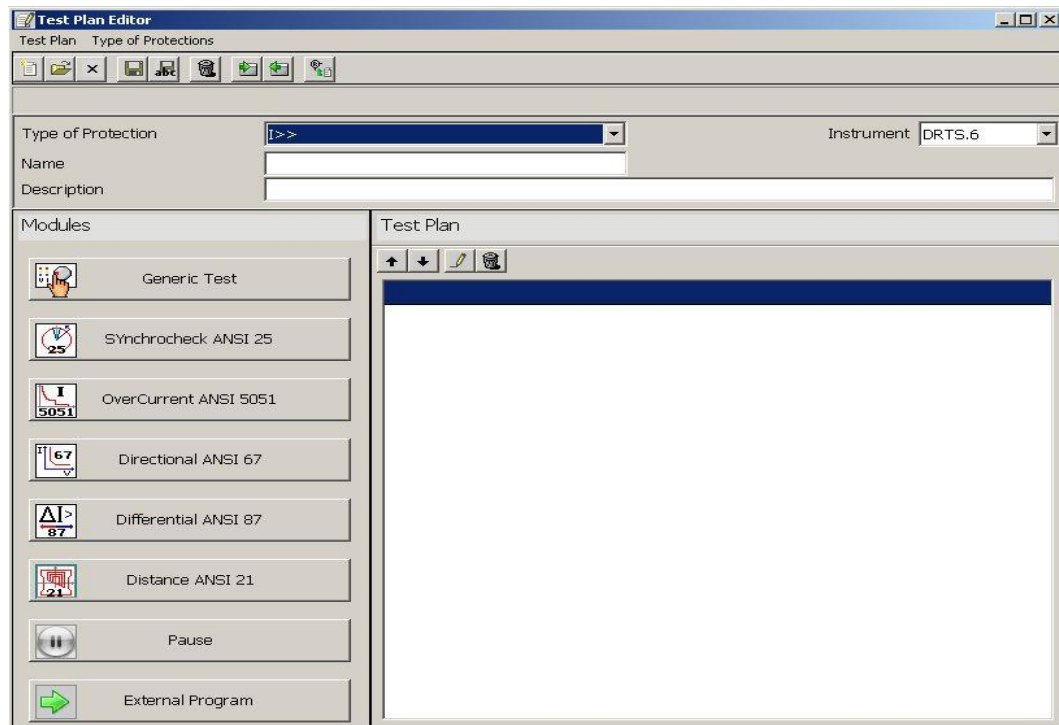
Tässä kohdassa käydään läpi lyhyesti testausohjelman luominen ISA DRTS-6 laitteelle. Tarkemmin *Test and Data Management Software*n käytöstä on liitteessä 1. Alireaktanssiporras toimii hyvänä mallina, koska se on hieman haasteellisempi ymmärtää ja täten testauslaitteessa tulee käyttöön mahdollisemman moni asia yksityiskohtaisesti. Kuvassa 14 on yksinkertaistettu havahtumisympyrä ja tehdastesteissä testataan koestuspisteet P1 ja P2.



**Kuva 14.** Alireaktanssin havahtumisympyrä. Reletestauksen tarkastelupisteet P1 ja P2.

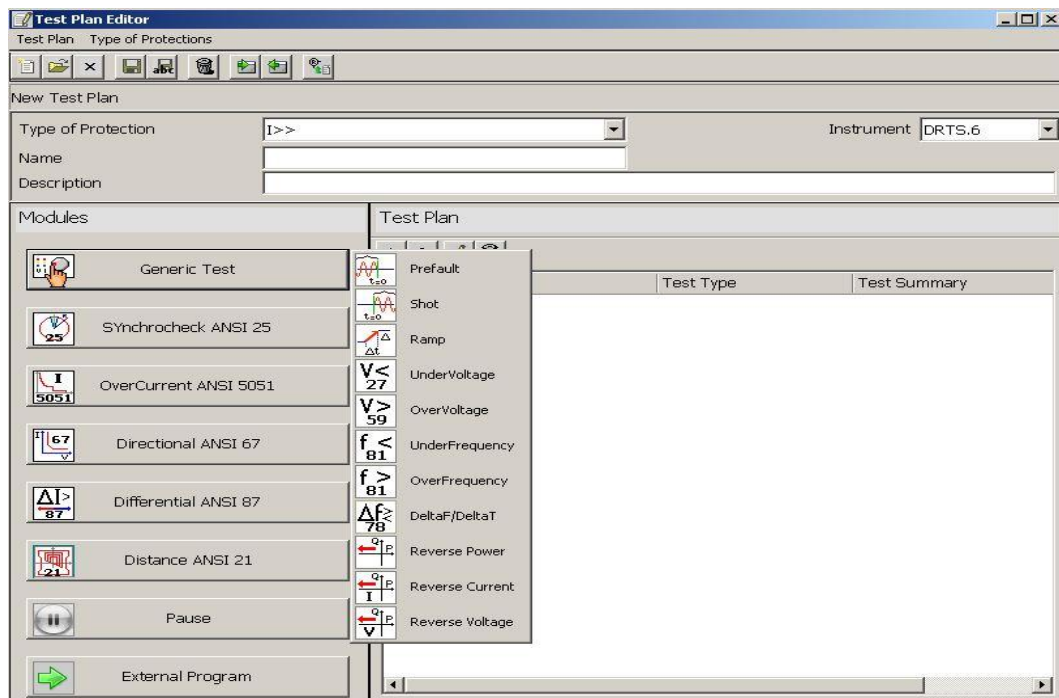
P1-pistettä koestaessa pidetään virta vakiona eli 5A, mutta virran vaihekulmina  $+90^\circ$ . Jännitettä nostetaan kolmivaiheisesti kunnes rele havahtuu. P2 pisteen testaaminen tapahtuu jännitteen ollessa vakio eli nimellinen vaihejännite. Siis tässä tapauksessa  $105/\sqrt{3}=60,6\text{V}$ . Virtaa nostetaan nolasta vaihekulmien ollessa jälleen  $+90^\circ$ .

Avataan *TDMS – Test And Data Management Software* ja sieltä testausmoduuli *Relay Test Plan Editor – Editor* (**Kuva 15.**) Editorilla voidaan luoda, editoida, muokata, poistaa ja tallentaa monitoimisia testaus suunnitelmia. Valitsemalla *Relay Test Plan Editor – Run* voidaan luodut suunnitelmat ajaa.



**Kuva 15.** *Test Plan Editor*

Tämän jälkeen avataan yläpalkista valikko *Test Plan* ja sieltä *New*. Uusi Test Plan on nyt käyttövalmis. Valitaan vasemmalla olevasta *Modules* valikosta *Generic Test* (**kuva16.**) *Generic Test* moduuli sisältää yleisimmät testausfunktiot.



**Kuva 16.** *Test Plan Editorin Generic Test-valikko.*

Valitaan *Generic Test*-valikosta kohta *Prefault*. Se pitää aina laittaa ensimmäiseksi luodessa testisuunnitelmaa. *Prefault*-makroon asetellaan alkuarvot testaustilanteelle (**kuva17.**) Esimerkiksi jänniteportaissa, joissa on lukituksia, on jännitteen alkuarvon oltava nimellinen tai suurempi kuin nolla.

**Generic Tests - Prefault**

Generic

Prefault

| Voltages |   |     | Currents |   |     |
|----------|---|-----|----------|---|-----|
|          | V | °   |          | A | °   |
| V1       | 0 | 0   | I1       | 0 | 0   |
| V2       | 0 | 120 | I2       | 0 | 120 |
| V3       | 0 | 240 | I3       | 0 | 240 |
| V4       | 0 | 0   | I4       | 0 | 0   |
|          |   |     | I5       | 0 | 120 |
|          |   |     | I6       | 0 | 240 |

Frequency  Hz

Duration  s

☐ Show messages to the operator

Remarks

Ok Cancel

**Kuva 17.** *Prefault* makro-näkymä.

Alireaktanssiportaan asetteluissa ei tarvitse asetella vian alkuarvoja eli *Prefault*-makroa, joten kaikki arvot jätetään nolliksi. Paina OK. Seuraavaksi valitaan *Generic Test*-valikosta *Ramp* makron. *Ramp*-makron ominaisuus on ajaa virtaa, jännitettä, taajuutta ja/tai vaihekulmia suuremmaksi tai pienemmäksi, kunnes rele havahtuu sen asettelujen mukaisesti (**kuva18.**)

**Generic Tests - Ramp**

Generic

Ramp

Frequency  Hz      Output       Shot type

| Initial Voltages |   |     | Initial Currents |   |     | Ramp Type |     |   |     |      |
|------------------|---|-----|------------------|---|-----|-----------|-----|---|-----|------|
|                  | V | °   |                  | A | °   | V         | phV | I | phI | Freq |
| ▶ V1             | 0 | 0   | I1               | 5 | 90  |           |     |   |     |      |
| V2               | 0 | 240 | I2               | 5 | 330 |           |     |   |     |      |
| V3               | 0 | 120 | ▶ I3             | 5 | 210 |           |     |   |     |      |
| V4               | 0 | 0   | I4               | 0 | 0   |           |     |   |     |      |
|                  |   |     | I5               | 0 | 120 |           |     |   |     |      |
|                  |   |     | I6               | 0 | 240 |           |     |   |     |      |

☒ Show messages to the operator

X< Alireaktanssi P1 pisteen testaus  
Havahtumisraja

Remarks

Ok      Cancel

**Kuva 18.** P1-havahtumispisteen asettelunarvot *Ramp*-makrossa.

Asetellaan alireaktanssin testauspisteen P1 asettelut. Asetellaan testimakroon alkuarvoiksi jännitteelle nolla voltia. Virta-arvoiksi toision nimellinen eli 5A ja vaihekulmaa lisättiin virralle joka vaiheeseen 90°. *Ramp*-makroon asetellaan nouseva jännite 0,2V sekunnissa. Viestiosioon laitetaan testin tiedot, jonka ohjelma näyttää testin alussa testaajalle ennen kuin aloittaa testin. Paina OK. Näin saadaan havahtumisrajan jännitearvo.



Seuraavaksi testataan P2-pisteen havahtumisraja (**kuva19**). Valitaan jälleen *Generic Test*-valikosta uusi *Ramp*-makro.

**Generic Tests - Ramp**

Generic | Ramp

Frequency: 50.0 Hz    Output: All Phases    Shot type: Pref.-Fault-Pref.

| Initial Voltages |      |     |
|------------------|------|-----|
|                  | V    | °   |
| V1               | 60,6 | 0   |
| V2               | 60,6 | 240 |
| V3               | 60,6 | 120 |
| V4               | 0    | 0   |

| Initial Currents |   |     |
|------------------|---|-----|
|                  | A | °   |
| I1               | 0 | 90  |
| I2               | 0 | 330 |
| I3               | 0 | 210 |
| I4               | 0 | 0   |
| I5               | 0 | 120 |
| I6               | 0 | 240 |

Ramp Type

|    | phV                                 | I   | phI | Freq |
|----|-------------------------------------|-----|-----|------|
| I1 | <input checked="" type="checkbox"/> | 0,1 | A/s |      |
| I2 | <input checked="" type="checkbox"/> | 0,1 | A/s |      |
| I3 | <input checked="" type="checkbox"/> | 0,1 | A/s |      |
| I4 | <input type="checkbox"/>            | 0   | A/s |      |
| I5 | <input type="checkbox"/>            | 0   | A/s |      |
| I6 | <input type="checkbox"/>            | 0   | A/s |      |

☒ Show messages to the operator

X< Alireaktanssi P2 pisteen testaus  
Havahtumisraja

Remarks

Ok    Cancel

**Kuva 19.** P2-havahtumispisteen asetteluarvot *Ramp*-makrossa.

Testauspisteen P2 alkuarvoiksi asetellaan virralle nolla ampeeria. Jännitearvoiksi toision nimellinen eli 60,6V (kuva19). *Ramp*-makroon asetellaan nouseva virta 0,1A sekunnissa. Viestiosioon jälleen tiedot testistä. Paina OK. Testi antaa P2-pisteen havahtumisrajan virta-arvon.

Seuraavaksi asetellaan laukaisuajan *Trip* testausarvot. Valitaan jälleen *Modules*-valikosta *Generic Test/Shot* makro (**kuva20.**)

**Generic Tests - Shot**

Generic | Shot

**Voltages**

|    | V    | °   |
|----|------|-----|
| V1 | 60,6 | 0   |
| V2 | 60,6 | 240 |
| V3 | 60,6 | 120 |
| V4 | 0    | 0   |

**Currents**

|    | A   | °   |
|----|-----|-----|
| I1 | 3,7 | 90  |
| I2 | 3,7 | 330 |
| I3 | 3,7 | 210 |
| I4 | 0   | 0   |
| I5 | 0   | 120 |
| I6 | 0   | 240 |

**Frequency**

Frequency: 50 Hz

Output: All Phases

Shot type: Pref.-Fault-Pref.

Tpre: 0 s

T Hold: 0 s

☒ Show messages to the operator

X< Alireaktanssi  
Trip-aika

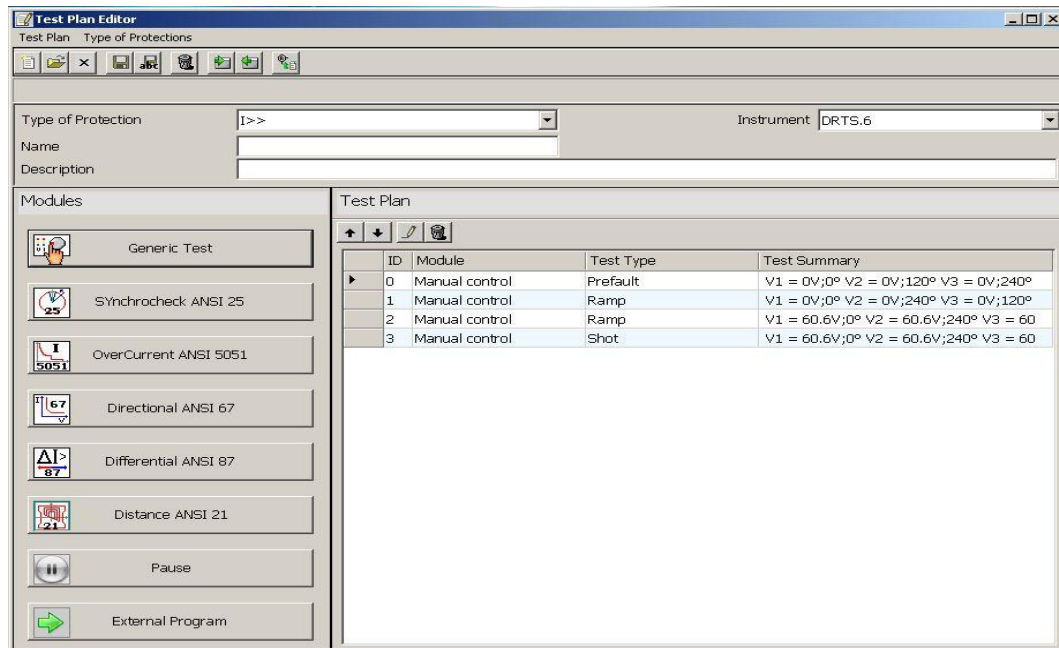
Remarks

Ok Cancel

**Kuva 20.** Laukaisuajan asetusravot *Shot*-makrossa.

*Shot*-makroon asetellaan sellaiset oletetut arvot, että tiedetään releen havahtuvan välittömästi, jolloin saadaan laukaisu aika mitattua. Alireaktanssiportaalle aseteltiin nimellinen jännite ja virraksi 3.7A, vaihekulma +90°. Kohdassa 3.2.12 on laskettuna teoreettinen havahtumisvirta 3.5A. Tässä testissä virta laitetaan heti suuremmaksi, jolloin rele havahtuu heti. Tällöin saadaan suoja-ajan laukaisu aika selville.

Tämän jälkeen *Test Plan Editor* näyttää seuraavalta (**kuva21.**) Nyt tehty *Test Plan* sisältää neljä makroa. Eli käytännössä testi ajaa neljä erillistä testiä yhdellä *Run*-komennolla.



**Kuva 21.** *Test Plan Editor*-näkymä. Testi makrojen luomisen jälkeen.

Tallenna testi normaalisti *Save as / "X< Alireaktanssi"*. Sulje editori. Avaa *Test and Data Management Software – Run*. Toiminta avaa listan tehdyistä testimakroista (**kuva22.**) Valitse listasta oikea testausmakro tuplaklikkaamalla.

**Test Plan Execution**

List   Test Plan

Select the Test plan to execute from the list by double-clicking on the row

| #  | Network           | Substation             | Line    | Node                    | Test Plan                 | Date             |
|----|-------------------|------------------------|---------|-------------------------|---------------------------|------------------|
| 53 | Pohjolan Voima Oy | Kaaranneskosken v...   | Linja1  | Generator Protection... | I2> Virnokuoma L1         | 4.8.2010 14:42   |
| 51 | Pohjolan Voima Oy | Kaaranneskosken v...   | Linja1  | Generator Protection... | Iv> Ylivirta 100%;60...   | 4.8.2010 13:20   |
| 50 | Pohjolan Voima Oy | Kaaranneskosken v...   | Linja1  | Generator Protection... | Iv> Ylivirta 100%;60...   | 4.8.2010 13:09   |
| 45 | Pohjolan Voima Oy | Kaaranneskosken v...   | Linja1  | Generator Protection... | I>> Ylivirta L1,L2,L3     | 3.6.2010 14:43   |
| 42 | Pohjolan Voima Oy | Kaaranneskosken v...   | Linja1  | Generator Protection... | I>>> Ylivirta L1,L2,L3    | 3.6.2010 14:24   |
| 40 | Pohjolan Voima Oy | Kaaranneskosken v...   | Linja1  | Generator Protection... | I>>> Ylivirta L3          | 3.6.2010 14:00   |
| 37 | Pohjolan Voima Oy | Kaaranneskosken v...   | Linja1  | Generator Protection... | I>>> Ylivirta L2          | 3.6.2010 13:53   |
| 36 | Pohjolan Voima Oy | Kaaranneskosken v...   | Linja1  | Generator Protection... | I>>> Ylivirta L1          | 3.6.2010 13:45   |
| 35 | Pohjolan Voima Oy | Kaaranneskosken v...   | Linja1  | Generator Protection... | I>> Ylivirta L1,L2,L3     | 2.6.2010 12:29   |
| 34 | Pohjolan Voima Oy | Kaaranneskosken v...   | Linja1  | Generator Protection... | I>> Ylivirta L3           | 2.6.2010 12:15   |
| 33 | Pohjolan Voima Oy | Kaaranneskosken v...   | Linja1  | Generator Protection... | I>> Ylivirta L2           | 2.6.2010 12:09   |
| 32 | Pohjolan Voima Oy | Kaaranneskosken v...   | Linja1  | Generator Protection... | I>> Ylivirta L1           | 2.6.2010 11:37   |
| 31 | Pohjolan Voima Oy | Kaaranneskosken v...   | Linja1  | Generator Protection... | I> Ylivirta L1-L2-L3      | 11.5.2010 13:32  |
| 28 | Pohjolan Voima Oy | Kaaranneskosken v...   | Linja1  | Generator Protection... | I> Ylivirta L3            | 6.5.2010 9:53    |
| 27 | Pohjolan Voima Oy | Kaaranneskosken v...   | Linja1  | Generator Protection... | I> Ylivirta L2            | 3.5.2010 15:07   |
| 25 | Pohjolan Voima Oy | Kaaranneskosken v...   | Linja1  | Generator Protection... | I> Ylivirta L1            | 3.5.2010 13:42   |
| 34 | Uljua             | Uljuan vesivoimalaitos | Linja 1 | Uljua A3                | X<< Alieaktanssi          | 30.12.2010 11:57 |
| 33 | Uljua             | Uljuan vesivoimalaitos | Linja 1 | Uljua A3                | di> Erovirta VAMP26...    | 16.9.2010 10:37  |
| 32 | Uljua             | Uljuan vesivoimalaitos | Linja 1 | Uljua A3                | di> Erovirta VAMP26...    | 16.9.2010 10:12  |
| 30 | Uljua             | Uljuan vesivoimalaitos | Linja 1 | Uljua A3                | Z<< Ali-impedanssi        | 15.9.2010 14:53  |
| 29 | Uljua             | Uljuan vesivoimalaitos | Linja 1 | Uljua A3                | Z< Ali-impedanssi         | 15.9.2010 14:46  |
| 27 | Uljua             | Uljuan vesivoimalaitos | Linja 1 | Uljua A3                | Q< Alimagneettointi P=... | 15.9.2010 13:13  |
| 24 | Uljua             | Uljuan vesivoimalaitos | Linja 1 | Uljua A3                | P<< Takateho              | 15.9.2010 11:03  |
| 23 | Uljua             | Uljuan vesivoimalaitos | Linja 1 | Uljua A3                | P< Takateho               | 15.9.2010 10:53  |
| 21 | Uljua             | Uljuan vesivoimalaitos | Linja 1 | Uljua A3                | di/dt Muutostaajuus       | 15.9.2010 9:56   |
| 18 | Uljua             | Uljuan vesivoimalaitos | Linja 1 | Uljua A3                | f< Alitaajuus             | 15.9.2010 9:43   |
| 16 | Uljua             | Uljuan vesivoimalaitos | Linja 1 | Uljua A3                | f< Alitaajuus             | 15.9.2010 9:31   |
| 15 | Uljua             | Uljuan vesivoimalaitos | Linja 1 | Uljua A3                | f>> yllitaajuus           | 14.9.2010 16:49  |
| 14 | Uljua             | Uljuan vesivoimalaitos | Linja 1 | Uljua A3                | f> Yllitaajuus            | 14.9.2010 16:40  |

**Kuva 22.** Editorilla tehdyt testimakrot.

**Test Plan Execution**

List   Test Plan

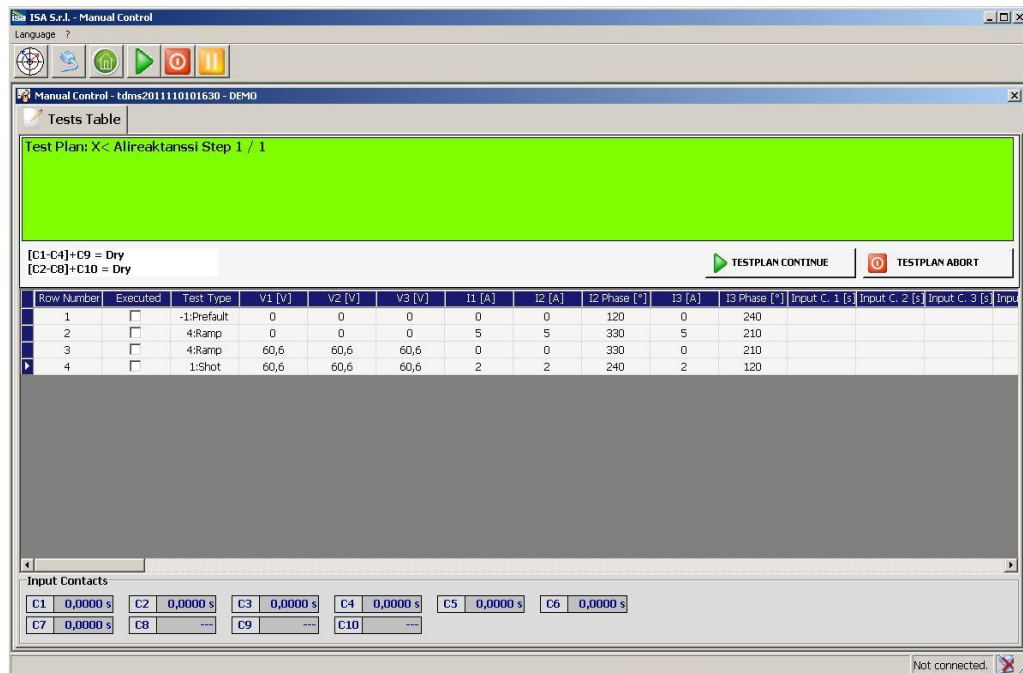
Select the macro functions of the test plan to be executed, then press the RUN button

| S...                                | ID             | Type     | Summary                                    |
|-------------------------------------|----------------|----------|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Manual control | Prefault | V1 = 0V;0° V2 = 0V;120° V3 = 0V;240° V...  |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Manual control | Ramp     | V1 = 0V;0° V2 = 0V;240° V3 = 0V;120° V...  |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Manual control | Ramp     | V1 = 60.6V;0° V2 = 60.6V;240° V3 = 60.6... |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Manual control | Shot     | V1 = 60.6V;0° V2 = 60.6V;240° V3 = 60.6... |

Run

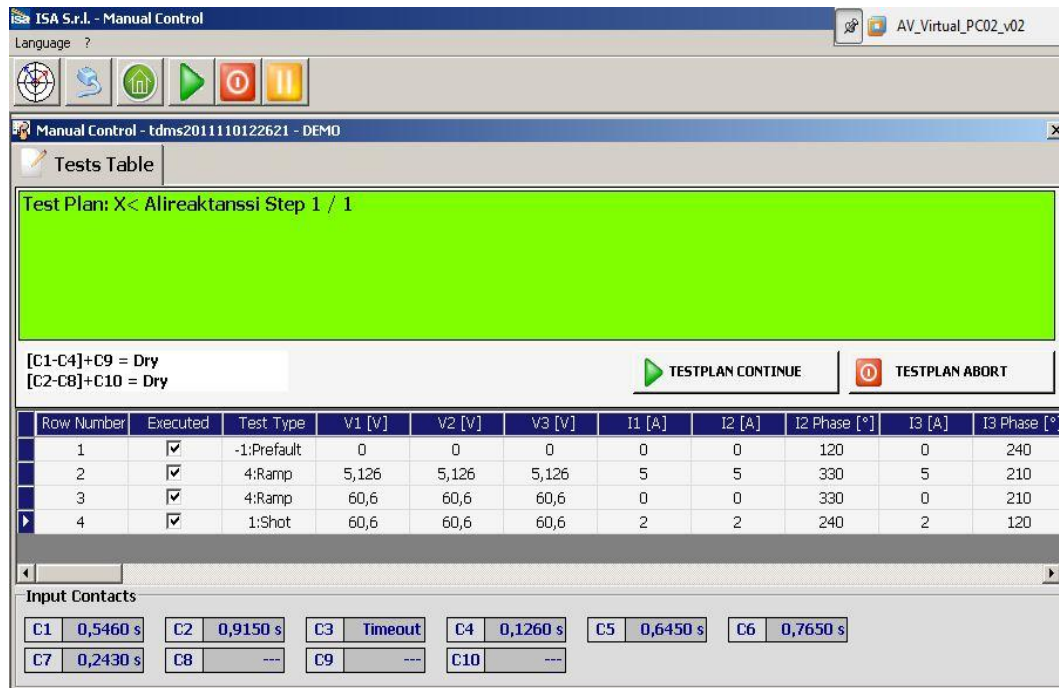
**Kuva 23.** Test Plan ns. suoritusikkuna.

*Test Plan Execution* ikkunasta nähdään suoritettavat testimakrot (**kuva23.**) Paina *Run*. Tämän jälkeen ilmestyy testilaitteen ns. ajoikkuna eli *Tests Table* (**kuva 24.**)



**Kuva 24.** *Test Table*-taulukko.

*Tests Table*-taulukko näyttää testin lähtöarvot, jotka luotiin aikaisemmin kuvissa 18-21 (**kuva24.**) Testi käynnistyy painamalla *Testplan Continue*. Toiminta suorittaa kaikki *Tests Table*-taulukosta valitut testimakrot. Testin voi pysäyttää painikkeesta *Testplan Abort*. Tulokset tulevat testin jälkeen *Tests Table*-taulukkoon josta ne voidaan tulostaa pdf-muotoon tai excel-taulukoksi (**kuva25.**)



**Kuva 25.** Tulokset *Tests Table*-taulukossa.

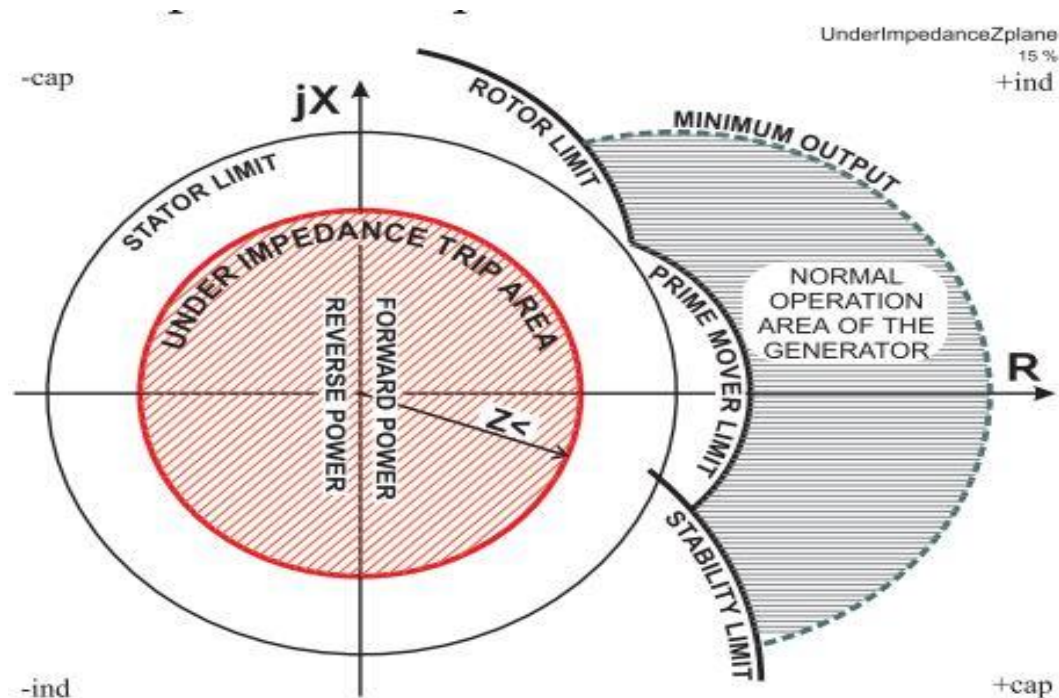
Edellä on esitetty yhden suojaportaain testausohjelman luonti. Tehdyt testausmakrot tallennetaan ohjelman tietokantaan kirjastoksi. Sieltä on helppo poimia tarvittavat testimakrot suojausportaittain seuraavaan reletestaukseen.

### 3.2.15 Ali-impedanssisuoja $Z_<$ (21)

Ali-impedanssisuojaa voidaan käyttää oikosulkusuojana, vaikka generaattorin magnetointi häviää. Se on vaihtoehtona jänniteohjattuun ylivirtasuojaan (kts. kohta 3.3.2). Generaattorin oikosulkuvirta on rajoitettu ylivirtaportaalla. Ylivirtaporras ei välttämättä huomaa oikosulkua, mutta ali-impedanssiporras huomaa vian. Ali-impedanssiporras (**kuva26.**) on herkkä positiiviselle impedanssille  $Z_1$ , joka voidaan laskea kaavasta:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1}$$

$Z_1$  = impedanssin absoluuttinen arvo,  $U_1$  = jännite,  $I_1$  = virta



**Kuva 26.** Ali-impedanssisuoja. Ali-impedanssisuojan trip-alue on punainen ympyrä. Jonka suuruus määritellään asetteluarvolla  $Z_{<}$ , joka on ympyrän säde. Isompi ympyrä on generaattorin normaali toiminta-alue.

### 3.2.16 Katkaisijavikasuoja CBFP [50BF]

Katkaisijavikasuojan toimintaperiaate perustuu toiminta-ajan tarkkailuun. Aika lasketaan asetellun laukaisureleen laukaisusta saman releen palautumiseen asti. Jos tämä aika on pidempi kuin katkaisijavikasuojaportaan toiminta-aika, aktivoi katkaisijavikavirtasuoja toisen ulostuloreleen, joka pysyy aktiivisena kunnes ensisijainen laukaisurele palautuu. Katkaisijavikasuojaporras toimii sekä ylivirta-että maasulkutilanteissa, koska sen toiminta perustuu pelkästään ulostuloreleen ohjauksen valvontaan.

## 4. TALOUDELLINEN TARKASTELU

### 4.1 Suojauksen merkitys

Suojausta voisi verrata vakuutukseen. Jos mitään ei satu, sen olemassa oloa ei edes huomaa. Vasta vahingon sattuessa suojaus todentaa tarpeellisuutensa ja sen hyödyt voidaan laskea lyhentyneinä tai kokonaan puuttuvina korjauskustannuksina. Jos taas suojaus ei ole asianmukaisessa kunnossa, voivat vahingot nousta mittaviksi generaattorin ja mahdollisesti turbiininkin vaurioituessa. Epäasianmukaisesti suojatussa generaattorissa tapahtuneen vian kokonaiskustannukset voidaan laskea, paitsi laitteiden suorista korjauskustannuksista, myös toimittamatta jääneen sähkön tilalle muualta ostetun sähkön kustannuksista. Tämän lisäksi voimalaitoksista, jotka syöttävät kaukolämpöverkkoa tai teollisuutta, myös lämmönjakelu keskeytyy tai vähenee. Yksinkertaistettuna esimerkkinä voidaan ottaa kaupunkilaitos, arkipäivä tammikuussa, jolloin lämmityskausi on menossa ja sähkön sekä lämmön kulutus huipussaan. Kokonaisuutena vian aiheuttamien kustannuksien tarkastelu muodostuu taulukon 1 ja 2 mukaisista osista./3/

**Taulukko 1.** Generaattorin vian suorat vaikutukset ja kustannukset.

|                           |                                |                               |
|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Vauriot generaattorille   | Korjaushinta generaattorille   | Korjausaika generaattorille   |
| Vauriot turbiinille       | Korjaushinta turbiinille       | Korjausaika turbiinille       |
| Vauriot muille laitteille | Korjaushinta muille laitteille | Korjausaika muille laitteille |



**Taulukko 2.** Generaattorivian epäsuorat vaikutukset ja kustannukset.

|                                       |  |   |
|---------------------------------------|--|---|
| Tyypillinen<br>sähkönkulutus alueella | Sähkön<br>myyntihinta/MWh.<br>Toimittamatta jääneen<br>sähkön kustannukset.  | Toimittamatta jääneen<br>sähkön tilalle ostetun (tai<br>muulla tavoin tuotetun)<br>sähkön kustannukset    |
| Tyypillinen<br>lämmönkulutus alueella | Lämmön myyntihinta /<br>MW. Toimittamatta<br>jääneen lämmön<br>kustannukset. | Toimittamatta jääneen<br>lämmön tilalle ostetun<br>(tai muulla tavoin<br>tuotetun) lämmön<br>kustannukset |

**4.2 Pörssistä ostetun sähkön kustannukset**

Jatketaan tarkastelua vian vuoksi tuottamatta jääneen sähkön tilalle pörssistä ostetun sähkön kustannusten laskennalla. Tarkastelujaksoksi on valittu toukokuun puolivälistä kesäkuun puoliväliin. Kyseessä ei ole siis lämpötilan kannalta pahin mahdollinen tilanne. Taulukossa 3 Sähkön pörssihinta Suomessa kesäkuussa 2010.

**Taulukko 3.** Sähkön pörssihinta Suomessa kesäkuussa 2010(euroa/MWh).

| Touko-Kesäkuu 2010 |        |        |        | Koneen teho: 50MW |        |         |         |
|--------------------|--------|--------|--------|-------------------|--------|---------|---------|
| Päivämäärä         | SYS    | Norja  | Tanska | Suomi             | Ruotsi | €/h     | €/vrk   |
| 10.6.2010          | 49,56  | 48,7   | 49,81  | 48,7              | 48,7   | 2435    | 58440   |
| 11.6.2010          | 47,92  | 50,3   | 47,66  | 45,31             | 45,31  | 2265,5  | 54372   |
| 12.6.2010          | 37,21  | 41,22  | 32,33  | 32,33             | 32,33  | 1616,5  | 38796   |
| 13.6.2010          | 28,41  | 28,93  | 28,93  | 28,93             | 28,93  | 1446,5  | 34716   |
| 14.6.2010          | 47,53  | 48,49  | 47,11  | 46,55             | 46,55  | 2327,5  | 55860   |
| 15.6.2010          | 47,17  | 47,94  | 45,95  | 45,95             | 45,95  | 2297,5  | 55140   |
| 16.6.2010          | 49,29  | 49,43  | 49,58  | 49,1              | 49,1   | 2455    | 58920   |
| 17.6.2010          | 50,59  | 50,77  | 51,08  | 50,56             | 50,56  | 2528    | 60672   |
| 18.6.2010          | 46,02  | 46,62  | 45,98  | 44,83             | 44,83  | 2241,5  | 53796   |
| 1kk ka.            | 41,183 | 42,007 | 39,821 | 39,011            | 39,011 | 1950,55 | 46813,2 |

## 5. YHTEENVETO

Työssä on perehdytty generaattorisuojauksen testaamiseen tehdasolosuhteissa. Samassa yhteydessä käsiteltiin yleisesti generaattorisuojausta ja kuinka generaattorisuojaportaat toimii vesivoimalaitoksissa. Työssä on käytetty malliprojektin suojausfunktioita, jotka vastaavat yleisempiä käytettäviä suojausportaita vesivoimalaitoksissa.

Laskentaesimerkkien avulla on pyritty havainnollistamaan miten haluttujen suojausfunktioiden arvot saadaan laskettua kilpi- ja nimellisarvoista.

Esimerkkinä releen testausmakron luomiseen on käytetty alireaktanssiporrasta. Testin lähtöarvot syötettiin ohjelmaan ja rele havahtui laskettuihin teoreettisiin arvoihin, joten voitiin todeta, että laskelmat on oikein laskettu.

Voidaan myös todeta että ajallisesti releen testaus valmiilla testimakroilla nopeutti huomattavasti suojareleen testausta tehdasolosuhteissa. Karkeasti ottaen nyt voidaan testata kaksi relettä siinä ajassa, kun vanhalla laitteella meni sama aika yhdessä suojareleessä.

Koskaan ei voida sivuuttaa aihetta hyvän generaattorisuojauksen merkityksestä taloudellisesti. Vesivoimatuotannossa on kriittisiä aikoja tulva-ajat ja syksyn sadekaudet. Jos näinä aikoina generaattori on huollossa viasta, jonka suojareleellä olisi voinut estää, tulva-aikana tappiot voivat nousta merkittäviksi.

Työ oli haastava ja opettava. Oli erittäin hyvä, että sain olla monessa projektissa mukana testaamassa releitä, jolloin joka kerta tuli uusia ideoita testaamiseen. Kehitysmahdollisuudet ovat valtavat tällä laitteella. Siihen onkin jo tehty makroja erovirtareleelle ja erilaisten mittamuuntimien testaamiseen.

## LÄHTEET

- [1] Energiateollisuus, Vesivoima. Viitattu 30.4.2010  
[URL:http://www.energia.fi/fi/sahko/sahkontuotanto/vesivoima](http://www.energia.fi/fi/sahko/sahkontuotanto/vesivoima)
- [2] Fingrid Oy, Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV 2007). VAMP Ltd. Yrittäjänkatu 15 65101 Vaasa, Finland. Viitattu 1.5.2010.  
[URL:http://www.fingrid.fi/attachments/fi/palvelut/kantaverkkopalvelut/liittymineen/vjv2007.pdf](http://www.fingrid.fi/attachments/fi/palvelut/kantaverkkopalvelut/liittymineen/vjv2007.pdf)
- [3] Häsä, Sanna. 2009. Generaattori suojauksen uusinta. Viitattu 1.5.2010.  
[URL:http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100125.pdf](http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100125.pdf)
- [4] VAMP 210 Generaattorinsuojarele, Käyttö- ja konfigurointiohje, Tekninen Selostus, ver002. Päivitetty 10/03. VAMP Ltd. Yrittäjänkatu 15 65101 Vaasa, Finland. Viitattu 1.5.2010.  
[URL:http://www.vamp.fi/Manuals/Finnish/VM210.FI002.pdf](http://www.vamp.fi/Manuals/Finnish/VM210.FI002.pdf)
- [5] VAMP 210 Generator protection relay, Testing manual, ver001. Päivitetty 10/08. VAMP Ltd. Yrittäjänkatu 15 65101 Vaasa, Finland. Viitattu 30.6.2010. [URL:http://www.vamp.fi/Manuals/English/VM210TEST.EN001.pdf](http://www.vamp.fi/Manuals/English/VM210TEST.EN001.pdf)
- [6] Sandvik, Jan. 2005. Viitattu 30.6.2010. VEO Academy, Generaattorisuojaus.
- [7] VEO intranet, Naviga. 1.7.2010.
- [8] Voimaa Vedestä 2007, Vesirakentaja. Viitattu 1.7.2010.  
 <[URL:http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/s%c3%a4hk%c3%b6/s%c3%a4hk%c3%b6ntuotanto/vesivoima/liitteet/voimaa%20vedest%c3%a4%202007.pdf?SectionUri=%2ffi%2fsahko%2fsahkontuotanto%2fvesivoima](http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/s%c3%a4hk%c3%b6/s%c3%a4hk%c3%b6ntuotanto/vesivoima/liitteet/voimaa%20vedest%c3%a4%202007.pdf?SectionUri=%2ffi%2fsahko%2fsahkontuotanto%2fvesivoima)>